

УДК 37.015.3

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО ПРЕОДОЛЕНИЯ ДОНАУЧНЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ КОНЦЕПЦИЙ ПРИ ОСВОЕНИИ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ ПОНЯТИЙ ОБУЧАЮЩИМИСЯ

Е.Г. Ушакова (Москва, Россия)

## Аннотация

*Постановка проблемы.* Одной из фундаментальных проблем педагогической психологии является устойчивость альтернативных концепций – донаучных, интуитивных представлений учащихся, которые противостоят системе научных понятий и проявляют высокую резистентность к традиционным методам обучения. В теории учебной деятельности Д.Б. Эльконина – В.В. Давыдова ключевым средством формирования теоретического мышления выступает моделирование, однако психологический механизм, посредством которого оно преодолевает альтернативные концепции, остается недостаточно раскрытым.

*Цель статьи* – выявить и систематизировать психологические функции моделирования в преодолении альтернативных концепций при освоении естественно-научных понятий.

*Методология.* Исследование выполнено в жанре обзорной статьи с элементами систематизации. Анализ охватил публикации за период 1967–2025 гг., выявленные по базам eLIBRARY.RU, Google Scholar, Scopus и Web of Science по ключевым словам: «моделирование», «альтернативные концепции», «ментальные модели», «когнитивный конфликт», «концептуальное изменение».

*Результаты.* Выделены три психологические функции моделирования: создание условий для когнитивного конфликта как механизма концептуального изменения; визуализация недоступных прямому наблюдению процессов с опорой на знаково-символическое опосредование; развитие исследовательских компетенций через конструирование и преобразование моделей. Эффективность моделирования определяется не формой представления (предметная, графическая, компьютерная), а включенностью учащегося в активное преобразование модели и рефлексию границ ее применимости.

*Заключение.* Моделирование выполняет тройственную функцию: цель формирования модельного мышления, средство познания и форма организации учебной деятельности. Перспективы дальнейших исследований связаны с лонгитюдным изучением устойчивости сформированных понятий и разработкой валидного диагностического инструментария.

**Ключевые слова:** моделирование, альтернативные концепции, ментальные модели, когнитивный конфликт, учебная деятельность, педагогическая психология.

**Ушакова Елена Григорьевна** – старший преподаватель Дирекции образовательных программ, Московский государственный педагогический университет; ORCID: 0000-0001-5110-4537. Идентификатор исследователя Web of Science: AEF-8058-2022; e-mail: babaluba2007@yandex.ru

**П**остановка проблемы. Одной из фундаментальных проблем педагогической психологии является устойчивость альтернативных концепций (misconceptions) – донаучных, интуитивных представлений учащихся, которые вступают в противоречие с системой научных понятий и проявляют высокую резистентность к традиционным методам обучения [Kotsis, 2023; Cheng, 2025]. Исследования показывают, что такие ментальные модели формируются

у детей задолго до начала систематического изучения естественных наук и сохраняются даже после успешного освоения учебного материала, зачастую существуя параллельно научным моделям [Piaget, 1947; Craik, 1967; Johnson-Laird, 1983].

В теории учебной деятельности Д.Б. Эльконина – В.В. Давыдова одним из ключевых средств формирования теоретического мышления выступает моделирование – учебное действие с помощью которого учащийся переходит

от внешнего, эмпирического описания явления к выделению его существенных, внутренних связей и фиксации их в знаково-символической форме [Давыдов, 1996]. Именно моделирование, согласно этой концепции, позволяет перейти от эмпирического обобщения (фиксация внешних признаков) к теоретическому (выявление генетически исходного отношения).

Однако, как показывает анализ публикаций, психологический механизм, посредством которого моделирование преодолевает альтернативные концепции, остается недостаточно раскрытым. Отсутствует системное понимание того, *какие именно функции* выполняет моделирование в трансформации ментальных моделей учащихся и *при каких условиях* эта трансформация происходит.

*Цель* статьи – выявить и систематизировать психологические функции моделирования в преодолении альтернативных концепций при освоении естественно-научных понятий на основе анализа зарубежных и отечественных исследований.

#### *Обзор научной литературы по проблеме*

*Ментальные модели и альтернативные концепции.* Понятие «ментальная модель» восходит к работам К. Крейка [Craik, 1967], который определил его как внутреннее репрезентативное образование, позволяющее человеку прогнозировать развитие событий и планировать действия. П. Джонсон-Лэрд развил эту идею, показав, что ментальные модели являются рабочими структурами, которые оперируют не формальной логикой, а репрезентациями конкретных ситуаций [Johnson-Laird, 1983]. В контексте естественно-научного образования такие модели часто вступают в конфликт с научными понятиями, образуя «альтернативные концепции» [Kotsis, 2023], которые обладают внутренней логикой и высокой устойчивостью к коррекции.

*Обучение на основе моделей (Model-based teaching and learning).* Параллельно с исследованиями ментальных моделей в когнитивной психологии в дидактике естественных наук сформировалось направление **model-based teaching and learning** (обучение на основе моделей).

Дж. Гоберт и Б. Бакли [Gobert, Buckley, 2000] определили «model-based teaching» как подход, при котором модели выступают не иллюстрацией к готовому знанию, а центральным инструментом познания: учащиеся строят, тестируют, пересматривают и применяют модели для объяснения явлений.

Фундаментальное обобщение исследований в области моделирования представлено в монографии Дж. Гилберта и Р. Джаста [Gilbert, Justi, 2016]. Авторы предлагают развернутую типологию моделей, используемых в школьном естественно-научном образовании, и, что особенно важно, детально анализируют, как именно происходит «перевод» ментальной модели учащегося в публичную репрезентацию (модель) и обратно – от модели к изменению ментальной репрезентации. Этот двунаправленный процесс, по мнению авторов, составляет ядро обучения на основе моделирования. Ключевой вывод монографии: эффективность моделирования определяется не столько точностью модели, но и тем, насколько полно учащийся осознает ее метакогнитивный статус – различие между моделью и реальностью, а также границы ее применимости.

Ключевую роль в становлении этого направления сыграла **модельная теория в научном образовании** (Modeling Theory in Science Education), разработанная И. Халуном [Halloun, 2006]. Согласно этой теории, модель понимается не как упрощенная копия реальности, а как концептуальная система, включающая область применимости, состав элементов, структуру и связи, законы функционирования и эмпирическую основу. Процесс моделирования есть циклическая деятельность: построение модели → проверка на эмпирическом материале → выявление несоответствий → уточнение модели.

*Типология моделей и «learning progression».* Принципиально важным для понимания места моделирования в учебной деятельности является различие **типов моделей**, предлагаемое А. Харрисоном и Д. Трегастом [Harrison, Treagust, 2000]. Авторы выделяют: масштабные модели; модели-анalogии; теоретические модели (ненаблюдаемые сущности); математические модели;

мысленные модели самого учащегося. Ключевой вывод состоит в том, что эффективное обучение требует эксплицитного обсуждения границ применимости модели.

Развитие компетенции моделирования как сквозной линии школьного образования рассматривается в исследовании К. Шварца и коллег [Schwarz et al., 2009], где авторы выстраивают прогресс в обучении (learning progression) для научного моделирования – от восприятия модели как «копии реальности» до понимания модели как инструмента проверки гипотез.

*Отечественная традиция.* В отечественной традиции наиболее развернутая теория моделирования как учебного действия представлена в работах В.В. Давыдова [Давыдов, 1996]. Моделирование рассматривается как центральное учебное действие, обеспечивающее формирование теоретического мышления. С культурно-исторической точки зрения Л.С. Выготского [Выготский, 2021], моделирование выступает как форма знаково-символического опосредования высших психических функций.

Переход от начальной к основной школе, как показано в работе Эльконина, Воронцова и Чудиновой [Эльконин и др., 2004], связан с изменением функции моделирования: от **отражающей** модели к **управляющей** – модели как «полигону для испытаний», на котором можно сознательно менять параметры и наблюдать последствия.

#### *Методология исследования*

*Тип исследования.* Настоящее исследование выполнено в жанре обзорной статьи с элементами систематизации научной литературы. Выбор данного типа обусловлен необходимостью интеграции разрозненных эмпирических и теоретических данных о психологических функциях моделирования в преодолении альтернативных концепций учащихся. Как отмечают Р. Дьюи и Д. Треагуст [Duit, Treagust, 2003], концептуальное изменение является междисциплинарной областью и обобщение накопленных знаний требует систематического анализа публикаций из разных научных школ.

*Базы данных и временные рамки.* Поиск источников осуществлялся по следующим электронным базам данных: eLIBRARY.RU (Научная электронная библиотека), Google Scholar, Scopus и Web of Science. Выбор этих баз обусловлен их репрезентативностью для педагогической психологии и смежных дисциплин (когнитивная психология, дидактика естественных наук). Временные рамки поиска охватывают период с 1967 по 2025 г. Нижняя граница связана с выходом фундаментальной работы К. Крейка «The Nature of Explanation» [Craik, 1967], в которой впервые было введено понятие «ментальная модель». Верхняя граница обусловлена необходимостью включения наиболее актуальных эмпирических исследований последних лет.

*Ключевые слова и стратегия поиска.* Поиск проводился по следующим ключевым словам и их комбинациям: на русском языке – «моделирование», «альтернативные концепции», «ментальные модели», «когнитивный конфликт», «концептуальное изменение», «моделирование в образовании», «model-based learning», «model-based teaching»; на английском языке – «modelling», «alternative conceptions», «misconceptions», «mental models», «cognitive conflict», «conceptual change», «model-based learning», «model-based teaching», «science education», «inquiry-based learning», «project-based learning». Для обеспечения полноты охвата использовались логические операторы AND и OR, а также усечение корней слов (например, «model\*» для включения терминов «model», «modelling», «modeling», «model-based»).

*Критерии включения и исключения источников.* В анализ включались публикации, удовлетворяющие следующим критериям: (а) наличие эмпирических или теоретических данных о связи моделирования с преодолением альтернативных концепций; (б) публикация в рецензируемом научном журнале, монография или сборник трудов авторитетных издательств (Springer, Routledge, Lawrence Erlbaum и др.); (в) язык публикации – русский или английский; (г) доступность полного текста для анализа. Из рассмотрения исключались: (а) тезисы конференций без полного текста;

(б) публикации, в которых моделирование упоминается лишь фрагментарно (менее двух страниц); (в) работы, посвященные исключительно техническим аспектам моделирования (например, программированию компьютерных моделей) без психолого-педагогического содержания.

*Процедура отбора источников.* Процедура отбора осуществлялась в несколько этапов. На первом этапе по ключевым словам было выявлено 1 247 потенциально релевантных публикаций. На втором этапе после удаления дубликатов и первичного ознакомления с аннотациями количество публикаций сократилось до 186 работ. На третьем этапе после полного прочтения текстов и применения критериев включения/исключения было отобрано 45 ключевых источников, которые легли в основу настоящего обзора.

Распределение источников по хронологическому принципу: 1960–1980-е гг. – 6 источников (классические работы по ментальным моделям и теории концептуального изменения); 1990–2000-е гг. – 14 источников (становление model-based teaching и model-based learning); 2010–2025 гг. – 25 источников (современные эмпирические исследования и обобщающие обзоры). Доля зарубежных источников составляет 87 % (40 из 46).

*Метод анализа.* Для обработки отобранных источников использовался метод качественного контент-анализа, позволяющий выделить смысловые категории и установить связи между ними. В процессе анализа были идентифицированы три основные психологические функции моделирования, которые легли в основу структуры раздела «Результаты». Кроме того, проведен сравнительный анализ отечественной и зарубежной традиций в понимании моделирования как учебного действия, что позволило выявить общие закономерности и специфические особенности.

*Ограничения исследования.* Представленный обзор имеет ряд ограничений. Во-первых, в фокусе внимания находились преимущественно публикации по естественно-научному образованию (физика, биология, химия, география). Вопрос о применимости выделенных функций моделирования к гуманитарным дисциплинам

требует отдельного исследования. Во-вторых, значительная часть проанализированных эмпирических исследований выполнена в лабораторных или квазилабораторных условиях, что ставит вопрос о внешней валидности результатов. В-третьих, из-за ограниченного объема статьи мы не включили детальный анализ работ по цифровому моделированию (AR/VR), за исключением технологического моделирования, хотя эта тема заслуживает отдельного обзора.

#### *Результаты исследования*

*Функция 1. Моделирование как средство создания когнитивного конфликта.* Важное направление современных исследований связано с тем, как согласуются собственные (спонтанные) представления учащегося с тем языком, на котором «говорит» модель [Wagh et al., 2025]. Авторы показывают, что успех моделирования зависит не только от сложности задачи, но и от того, насколько учащийся может связать свою интуитивную догадку с тем, как модель представляет явление. Чем яснее ученик видит, где его собственные идеи «совпадают» с языком модели, тем эффективнее происходит обучение.

Аргументация, как показано в работе [García-Carmona, 2023], является неотъемлемым компонентом моделирования в естественно-научном образовании. Процесс построения модели включает выдвижение гипотез, их обоснование и критическую оценку, что требует от учащихся способности к аргументации. Без эксплицитного включения задач на аргументацию моделирование может оставаться на уровне формальной манипуляции знаками, не затрагивая глубинные альтернативные концепции обучающегося.

Теория концептуального изменения [Posner et al., 1982] описывает четыре необходимых условия, которые обеспечивают возможность отказа обучающихся от существующих у них альтернативных концепций: неудовлетворенность существующей моделью, понятность новой модели, ее правдоподобие и продуктивность (fruitfulness). Моделирование способно создавать первые два условия. Р. Дьюи и Д. Треагуст [Duit, Treagust, 2003] уточняют, что концептуальное изменение

(переход от собственных ментальных моделей к культурным, принятым в науке моделям) – это перестройка целостной системы представлений. Современные исследования показывают, что альтернативные концепции не являются набором случайных ошибок – они образуют связную систему, которая по своей структуре аналогична научной теории [Vosniadou, 2013]. Эта системность придает им внутреннюю логику и объяснительную силу в пределах повседневного опыта, что и объясняет их высокую резистентность к традиционным методам обучения.

Мишеллин Чи [Chi, 2008] предложила различать три типа концептуального изменения. Первый тип – пересмотр убеждений (*belief revision*): учащийся просто добавляет новую информацию, не меняя общую картину. Второй тип – трансформация ментальной модели: меняются связи между элементами, но сам объект остается в той же категории. Третий, наиболее глубокий тип – категориальный сдвиг (*categorical shift*): объект переносится в другую онтологическую категорию (например, от представления о тепле как «жидкости» или «веществе» к представлению о тепле как «процессе»).

Первый тип может произойти и без моделирования – достаточно новой информации. А вот второй и особенно третий типы требуют, чтобы учащийся увидел несостоятельность старой модели и прочувствовал новую онтологию. Именно это позволяет сделать интерактивное моделирование: ученик сам изменяет параметры модели, наблюдает результаты и убеждается, что старая категоризация не работает, а новая – работает.

Иной подход предложили А. ди Сесса и Б. Шерин [Sessa, di, Sherin, 1998]. В отличие от теории концептуального изменения, которая рассматривает альтернативные представления как связанные «наивные теории», они называют их «феноменологическими примитивами» – маленькими объяснительными схемами, извлеченными из повседневного опыта («толкать – значит придавать движение», «больше – значит сильнее» и т.п.). Такие примитивы не образуют связной системы, они возникают по ситуации. Поэтому их преодоление требует не замены одной теории

другой, а многократного предъявления ситуаций, в которых старый примитив не работает, а новый – работает. Именно это и позволяет сделать моделирование: учащийся в интерактивном режиме проверяет свои интуитивные схемы и убеждается в их ограниченности.

Подводя итоги исследований, посвященных трем подходам к концептуальному изменению, можно выделить общее для них всех ключевое условие эффективности моделирования: оно должно быть интерактивным и давать учащемуся возможность самостоятельно преобразовать модель [Markula, Aksela, 2022].

*Функция 2. Визуализация недоступного и знаково-символическое опосредование.* С точки зрения культурно-исторической психологии [Выготский, 1983] модель выступает как знаково-символическая форма, позволяющая «схватить» существенное отношение объекта. В исследовании Задорожного [Zadorozhnyi, 2024] показано, что создание учащимися измерительных устройств на базе Arduino значительно улучшает понимание абстрактных понятий. В работе [Mamaeva et al., 2024] описано использование 3D-моделирования для развития пространственного мышления.

Важный нюанс: модель сама по себе не гарантирует формирования научного понятия. Если модель слишком сложна или, напротив, чрезмерно упрощена, она может породить новые альтернативные концепции [Tanas, Fulmer, 2023].

Однако одной визуализации недостаточно. Современные исследования подчеркивают: мало просто дать ученику наглядную модель – важно, как именно сформулировано задание [Cortés-Morales, Marzabal, 2025]. Авторы выделяют три ключевых признака хорошего «модельного» задания. Первый – оно должно быть связано с реальным, «живым» явлением, а не с абстрактной схемой. Второй – ученик должен не просто наблюдать, а сам проводить «настоящее» исследование (выдвигать гипотезы, проверять, делать выводы). Третий – у задания не должно быть одного-единственного правильного ответа; разные ученики могут найти разные решения, и это стимулирует обсуждение и пересмотр своих моделей.

*Функция 3. Развитие исследовательских компетенций через конструирование моделей.* В отечественной теории учебной деятельности развитие этого аспекта связывают с переходом от простой «отражающей» модели к «управляющей» – такой, на которой можно сознательно менять параметры и наблюдать последствия [Эльконин и др., 2004].

В мировой практике этот подход получил название «исследование на основе моделей» (model-based inquiry). Его принципиальное отличие от традиционного лабораторного практикума раскрыто в работе М. Виндшитла, Дж. Томпсона и М. Браатен [Windschitl et al., 2008]. Если в обычной лабораторной работе ученик идет по инструкции и проверяет ожидаемый результат, то здесь он действует иначе: строит модель явления → делает на ее основе предсказание → проводит эксперимент для проверки предсказания → и на этой основе пересматривает модель. Именно эта четырехтактная структура составляет ядро подлинного исследовательского поведения.

Почему это работает? Ключевой механизм, по мнению Джона Клемента [Clement, 2000], – «мысленное экспериментирование с моделью». Ученик не просто заучивает алгоритм, а в уме «прогоняет» модель в разных условиях, отслеживает следствия и находит границы ее применимости. Этот процесс отличается и от формальной логики, и от простого перебора вариантов – он целенаправлен и опирается на образное мышление.

На практике реализация такого подхода предполагает, что учащиеся не просто пользуются готовой моделью, а активно ее конструируют и модифицируют. Например, метод «декодирования» вычислительных моделей [Lee et al., 2025] предлагает ученикам анализировать и менять код модели, чтобы увидеть, как это влияет на результат. Анализ «дизайн-ходов» учащихся [Eloy et al., 2024] подтверждает: полезнее всего не просто воспроизводить готовый код, а самостоятельно модифицировать параметры модели и проверять гипотезы.

Исследование Б. Айду [Aidoo, 2024] обобщает этот опыт: подлинное понимание приходит не от самой модели, а от полного цикла деятельности, который включает самостоятельную

формулировку вопроса, выдвижение гипотезы, построение модели, ее проверку и рефлексию результатов. Ключевую роль здесь играет работа с неполными или противоречивыми данными [Windschitl et al., 2008]: когда данные не укладываются в модель, ученик вынужден ее пересматривать и уточнять – именно этот конфликт запускает механизм концептуального изменения.

Однако важен нюанс, выявленный в исследовании [Franco-Mariscal, 2024]: учащийся может формально верно решить задачу, манипулируя готовой моделью («нажать на нужную кнопку»), но при этом сохранить глубинные, неверные представления о том, как явление работает. Они всплывают, как только меняется контекст задачи. Этот результат показывает, что оценивать нужно не только правильность ответа (продукт), но и сам процесс рассуждений ученика.

Таким образом, развитие исследовательских компетенций через моделирование требует: (а) перехода к управляющей модели; (б) организации полного цикла «модель → предсказание → проверка → пересмотр»; (в) самостоятельного конструирования и модификации модели учащимися; (г) работы с неполными или противоречивыми данными; (д) диагностики не только результата, но и процесса.

*Технологическое моделирование (AR/VR: дополненная и виртуальная реальности) как частный случай.* В последнее десятилетие технологии дополненной (AR) и виртуальной реальности (VR) стали новой формой реализации моделирования [Dunleavy, Dede, 2013; Papanastasiou et al., 2019]. AR/VR могут усиливать описанные выше функции, однако их эффективность определяется педагогическим дизайном, а не технологией [Ga, Chang, Martin, 2024]. Наибольший эффект достигается при сочетании разных типов моделей [Tanas, Fulmer, 2023].

Обновленный обзор У. ван Йолингена и коллег [Joolingen, van et al., 2024] систематизирует исследования по использованию физических и цифровых моделей в естественно-научном образовании. Ключевой вывод авторов: эффективность моделирования определяется не типом модели (физическая или цифровая), а тем, насколько

модель позволяет учащемуся экспериментировать с параметрами и получать обратную связь о последствиях своих действий. Цифровые модели имеют преимущество в скорости и вариативности экспериментирования, но уступают физическим в тактильной обратной связи. Оптимальным признается сочетание обоих типов моделей.

Один из примеров успешной интеграции технологического моделирования в учебный процесс представлен в работе Чунга и коллег [Chung et al., 2020], где описывается применение iSTEAM-модели проектного обучения для старшеклассников. Авторы показывают, что создание учащимися собственных VR-моделей (например, прототипов устройств для пожилых людей) не только развивает инженерное мышление, но и способствует преодолению наивных представлений о возможностях и ограничениях технологий.

Линь и соавторы [Lin et al., 2023] исследовали влияние VR-инструкции, построенной по модели STEAM-6E, на развитие креативности и учебной мотивации учащихся с разными когнитивными стилями. Полученные данные свидетельствуют, что VR-моделирование особенно эффективно для учащихся с последовательным (сериалистским) когнитивным стилем – тех, кто привык изучать материал шаг за шагом, логически выстраивая цепочку. В то же время для учащихся с целостным (холистским) стилем – тех, кто сначала старается увидеть общую картину, а потом уже вникает в детали, – VR-моделирование требует дополнительной педагогической поддержки (например, предварительного общего обзора или работы в паре с «последовательным» партнером). Этот результат важен для понимания того, что эффективность технологического моделирования не универсальна, а зависит от индивидуальных особенностей учащихся.

*Препятствия для внедрения моделирования и требования к учебным моделям.* Анализ исследований позволяет выделить ряд препятствий для внедрения моделирования: недостаточная подготовка педагогов [Klemencic et al., 2023]; преобладание пассивных форм [Markula, Aksela, 2022]; дефицит диагностического инструментария [Zhang et al., 2024].

Еще один аспект дефицита диагностического инструментария связан с тем, что большинство исследований, отмечает Задорожный [Zadorozhnyi, 2024], оценивают краткосрочные эффекты использования моделирования (сразу после вмешательства), но не отслеживают устойчивость сформированных понятий во времени. Это создает риск того, что зафиксированные улучшения могут быть следствием «эффекта новизны», а не подлинного концептуального изменения.

Эмпирическое исследование К.Е. Шварц [Schwarz, 2024] на материале химии подтверждает, что диагностика уровня освоения понятий должна учитывать не только предметные знания, но и эпистемологические представления учащихся о природе моделей. Автор показывает, что переход на более высокий уровень моделирования невозможен без рефлексии границ применимости модели.

Важный вклад в понимание возрастной динамики моделирования вносят работы Е.В. Чудиновой [Чудинова и др., 2024], показывающие, что переход к управляющей модели происходит в подростковом возрасте. Применительно к предметам естественно-научного цикла деятельностный подход разработан в работах А.Б. Воронцова и С.П. Саниной [Воронцов, Санина, 2015]. Инструментарий для диагностики уровня освоения понятия предложен П.Г. Нежновым, С.Ф. Горбовым и О.В. Соколовой [Нежнов и др., 2018] (SAM – Student Achievement Monitoring).

Обобщая результаты, представленные выше, а также анализ препятствий внедрения, можно сформулировать пять требований к разработке учебных моделей, направленных на преодоление альтернативных концепций.

1. Ориентация на самостоятельное преобразование (а не на пассивное наблюдение).
2. Создание условий для когнитивного конфликта.
3. Баланс между наглядностью и научной точностью.
4. Встроенная рефлексия (прояснение границ применимости).
5. Сочетание разных типов моделей.

*Заключение.* Проведенный систематический анализ зарубежных и отечественных исследований позволяет сформулировать ряд обобщающих выводов о психологических функциях моделирования в преодолении альтернативных концепций учащихся при освоении естественно-научных понятий.

**Первая функция** моделирования – создание условий для когнитивного конфликта. Как показано в работах [Posner et al., 1982; Duit, Treagust, 2003; Vosniadou, 2013], преодоление устойчивых донаучных представлений требует не простого информирования, а организации деятельности, в которой учащийся сталкивается с несостоятельностью своей ментальной модели. В пункте *Функция 1. Моделирование как средство создания когнитивного конфликта* были выделены четыре условия концептуального изменения, и учебное моделирование способно обеспечивать первые два из них: неудовлетворенность существующей моделью и понятность новой модели. При этом, согласно [Chi, 2008], наиболее глубокий тип концептуального изменения – категориальный сдвиг (например, переход от представления о тепле как «веществе» к представлению о тепле как «процессе») – практически невозможен без опоры на наглядную интерактивную модель. Альтернативная трактовка [Sessa, di, Sherin, 1998] рассматривает альтернативные представления как «феноменологические примитивы», и в этом случае моделирование позволяет многократно предъявлять ситуации, в которых старый примитив не работает, обеспечивая его замену.

**Вторая функция** – визуализация недоступных прямому наблюдению процессов через знаково-символическое опосредование. С культурно-исторической точки зрения [Выготский, 1983] модель выступает как «культурное орудие», с помощью которого учащийся осваивает не только предметное содержание, но и способы мышления, зафиксированные в научном знании. Эмпирические исследования [Zadorozhnyi, 2024; Mamaeva et al., 2024] подтверждают, что создание учащимися собственных измерительных устройств и трехмерных моделей значительно улучшает понимание абстрактных понятий.

Однако, как подчеркивают [Harrison, Treagust, 2000; Tanas, Fulmer, 2023], ключевым условием эффективности является эксплицитное обсуждение границ применимости модели – без этого модель может закрепить новые альтернативные концепции вместо того, чтобы преодолевать старые.

**Третья функция** – развитие исследовательских компетенций через конструирование и преобразование моделей. Переход от отражающей модели к управляющей [Эльконин и др., 2004] знаменует собой качественный сдвиг в учебной деятельности подростков. Принципиальное отличие model-based inquiry от традиционного лабораторного практикума раскрыто в работе [Windschitl et al., 2008]: четырехтактная структура – модель → предсказание → проверка → пересмотр – составляет ядро подлинного исследовательского поведения. Дж. Клемент [Clement, 2000] показал, что ключевым механизмом является «мысленное экспериментирование с моделью», которое принципиально отличается как от формального логического вывода (оно опирается на образы), так и от эмпирического перебора (оно целенаправленно). Метаанализ [Zhang et al., 2024] подтверждает, что проектный подход, включающий создание учащимися собственных моделей, значительно превосходит традиционное обучение по таким показателям, как креативность, критическое мышление и способность решать проблемы.

Обобщая результаты анализа, можно заключить, что моделирование в образовании выполняет **тройственную функцию**: (а) цель – формирование модельного мышления как компонента теоретического мышления; (б) средство – инструмент познания, позволяющий проверять гипотезы и прогнозировать следствия; (в) форма организации учебной деятельности – проектная работа по созданию и проверке моделей [Lesh, Doerr, 2003]. Эффективность моделирования определяется не формой его реализации (предметная, графическая, компьютерная модель, AR/VR), а включенностью учащегося в активное преобразование модели, проверку гипотез и рефлексивные результаты. Пассивное наблюдение за готовыми моделями, как убедительно показано [Markula, Aksela, 2022], не дает развивающего эффекта.

**Перспективы дальнейших исследований** связаны с несколькими направлениями. Первое – лонгитюдное изучение устойчивости сформированных через моделирование понятий. Требуется ответить на вопрос: сохраняется ли эффект через 6–12 месяцев после завершения обучения? Второе – сравнительный анализ эффективности разных типов моделей (предметные vs компьютерные vs мысленные) для разных возрастных групп и разных типов альтернативных концепций. Третье – разработка валидного диагностического инструментария, позволяющего дифференцировать поверхностное запоминание и подлинное концептуальное изменение. В качестве одного из прототипов может выступать методика SAM (Student Achievement Monitoring), предложенная [Нежнов и др, 2018], однако она требует адаптации для диагностики именно альтернативных концепций, а не общего уровня освоения понятия. Четвертое – исследование условий, при которых технологическое моделирование (AR/VR, симуляции) дает преимущество перед традиционными формами, а когда оно оказывается избыточным. Пятое – изучение профессиональной подготовки учителей к организации model-based inquiry в классе, поскольку, как показано [Klemencic et al., 2023], именно недостаточная готовность педагогов

является одним из главных препятствий для внедрения учебного моделирования.

Трехмерная модель развития критического мышления [Franco-Mariscal et al., 2024] включает когнитивные навыки, диспозиции и ценности. Моделирование, как показано в работе, способствует развитию всех трех измерений – от анализа и оценки информации до рефлексии собственных познавательных стратегий. Это направление представляет собой перспективную область для дальнейших исследований.

Практическая значимость проведенного обзора заключается в формулировке конкретных требований к разработке учебных моделей для формирования научных понятий: (1) ориентация на самостоятельное преобразование, а не на пассивное наблюдение; (2) создание условий для когнитивного конфликта (возможность сравнить свой прогноз с результатом); (3) баланс между наглядностью и научной точностью; (4) встроенная рефлексия, проясняющая границы применимости модели; (5) сочетание разных типов моделей (предметная → графическая → мысленный эксперимент). Эти требования могут быть использованы при проектировании учебных программ, разработке цифровых образовательных ресурсов и в системе повышения квалификации учителей естественно-научных дисциплин.

## Библиографический список

1. Воронцов А.Б., Санина С.П. Деятельностный подход к географическому образованию школьников. М.: Авторский клуб, 2015. 68 с.
2. Выготский Л.С. Собрание сочинений: в 6 т. / под ред. А.М. Матюшкина. М.: книга по требованию, 2021. Т. 3: Проблемы развития психики. 369 с.
3. Давыдов В. В. Теория развивающего обучения. М.: ИНТОР, 1996. 544 с.
4. Нежнов П.Г., Горбов С.Ф., Соколова О.В. Диагностика учебно-предметных компетенций. М.: Авторский клуб, 2018. 112 с.
5. Чудинова Е.В., Зайцева В.Е., Минкин Д.И. Самостоятельность и инициативность старших школьников в учебном моделировании // Психологическая наука и образование. 2024. Т. 29, № 1. С. 61–74. DOI: <http://doi.org/10.17759/pse.2024290105>
6. Эльконин Б.Д., Воронцов А.Б., Чудинова Е.В. Подростковый этап школьного образования в системе Эльконина – Давыдова // Вопросы образования. 2004. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podrostkovyy-etap-shkolnogo-obrazovaniya-v-sisteme-elkonina-davydova> (дата обращения: 12.04.2026).
7. Aidoo, B. (2024). A reflective study on adopting inquiry-based science teaching methods. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 6 (29), 1–18. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-024-00119-3>

8. Cheng, X. (2025). Conceptual change in science education: From cold to hot approaches. *Science Insights Education Frontiers*, 26 (1), 4199–4201. DOI: <http://doi.org/10.15354/sief.25.co381>
9. Chi, M.T.H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 61–82). Routledge. DOI: <http://doi.org/10.4324/9780203874813-9>
10. Chung, C.-C., Huang, S.-L., Cheng, Y.-M., & Lou S.-J. (2020). Using an iSTEAM project-based learning model for technology senior high school students. *International Journal of Technology and Design Education*, 10, 905–941. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10798-020-09578-x> (access date: 15.04.2026).
11. Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1041–1053. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416901>
12. Cortés-Morales, A., & Marzabal, A. (2025). The design of science teaching and learning tasks with modeling potential. *Studies in Science Education*, 1 (29). DOI: <http://doi.org/10.1080/03057267.2025.2493990>
13. Craik, K. (1967). *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.
14. Duit, R., & Treagust, D.F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25 (6), 671–688. DOI: <http://doi.org/10.1080/09500690305016>
15. Dunleavy, M., & Dede, C. (2013). Augmented reality teaching and learning. In *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (pp. 735–745). Springer. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5\\_59](http://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_59)
16. Eloy, A., Fuhrmann, T., Wagh, A., de Deus Lopes, R., Wilkerson, M., & Blikstein, P. (2024). Decomposing students' design moves when programming agent-based models. In R. Lindgren, T.I. Asino, E.A. Kyza, C.K. Looi, D.T. Keifert, E. Suárez (Eds.), *Proceedings of the 18th International Conference of the Learning Sciences – ICLS 2024* (pp. 738–745). International Society of the Learning Sciences.
17. Franco-Mariscal, A.J. (Ed.). (2024). *Critical Thinking in Science Education and Teacher Training*. Cham, Springer Nature Switzerland. XXI (Contemporary Trends and Issues in Science Education). DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-031-78578-8>
18. Fuhrmann, T., Rosenbaum, L.F., Wagh, A., Eloy, A., Wolf, J., Blikstein, P., & Wilkerson, M.H. (2024). Right but wrong: How students' mechanistic reasoning and conceptual understandings shift when designing agent-based models using data. *Science Education*. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.21890>
19. Ga, S.-H., Chang, C.-Y., & Martin, S. (2024). Students' acceptance of Arduino technology integration in student-led science inquiry: Insights from the Technology Acceptance Model. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 1849–1858. DOI: <http://doi.org/10.1109/TLT.2024.3406964>
20. García-Carmona, A. (2023). Argumentation in science education. In R. Gunstone (Ed.), *The International Encyclopedia of Science Education*. Springer.
21. Gilbert, J.K., & Justi, R. (2016). *Modelling-based Teaching in Science Education*, Cham, Springer International Publishing (Models and Modeling in Science Education; Vol. 9). DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3>
22. Gobert, J.D., & Buckley, B.C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 891–894. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416802>
23. Halloun, I.A. (2006). *Modeling Theory in Science Education*. Springer.
24. Harrison, A.G., & Treagust, D.F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1011–1026. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416809>
25. Johnson-Laird, P. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness*, Cambridge, Harvard University Press.
26. Joolingen, W.R., van Jong, de, T., & Dimitrakopoulou, A. (2024). Physical and digital models in science education. In *International Handbook of Computer-Supported Collaborative Learning*, Springer.

27. Klemencic, E., Ploj, Virtič M., & Majer, Kovačič J. (2023). The role of teacher education in the science literacy development. *Journal of Elementary Education*, 16 (4), 1–22. DOI: <http://doi.org/10.30958/aje.10-4-5>
28. Kotsis, K.T. (2023). Alternative ideas about concepts of physics, a timelessly valuable tool for physics education. *Eurasian Journal of Science and Environmental Education*, 3 (2), 83–97. DOI: <http://doi.org/10.30935/ejsee/13776>
29. Lee, I.A., Sagartz, M., Meyer, P.F., & Anderson, E. (2025). Making sense of models: Connecting science and math through decoding and modifying computational models. *Science Scope*, 48(2), 39–47. DOI: <http://doi.org/10.1080/08872376.2025.2456246>
30. Lesh, R., & Doerr, H.M. (Eds.) (2003). *Beyond Constructivism: Models and Modeling Perspectives on Mathematics Problem Solving, Learning, and Teaching*. Lawrence Erlbaum.
31. Lin, Y.-H., Lin, H.-C.K., Wang, T.-H., & Wu, C.-H. (2023). Integrating the STEAM-6E model with virtual reality instruction. *Sustainability*, 15 (7), 6269. DOI: <http://doi.org/10.3390/su15076269>
32. Mamaeva, E.A., Utemov, V.V., Abramova, I.V., & Shestakova, L.G. (2024). Enhancing research skills of schoolchildren through 3D modeling. *Perspectives of Science and Education*, 68 (2), 595–613. DOI: <http://doi.org/10.32744/pse.2024.2.36>
33. Markula, A., & Aksela, M. (2022). The key characteristics of project-based learning: how teachers implement projects in K-12 science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 4 (2), 1–17. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-021-00042-x>
34. Papanastasiou, G., Drigas, A., Skianis, C., Lytras, M., & Papanastasiou, E. (2019). Virtual and augmented reality effects on K-12, higher and tertiary education students' twenty-first century skills. *Virtual Reality*, 23 (4), 425–436. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10055-018-0363-2> (access date: 20.05.2026).
35. Piaget, J. (1947). *La représentation du monde chez l'enfant*. Paris, France.
36. Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., & Gertzog, W.A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66 (2), 211–227. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
37. Schwarz, C.V., Reiser, B.J., Davis, E.A., Kenyon, L., Acher, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling. *Journal of Research in Science Teaching*, 46 (6), 632–654. DOI: <http://doi.org/10.1002/tea.20311>
38. Schwarz, C.E. (2024). *Exploring Students' Conceptual and Epistemic Learning in Model-Centered Chemistry Courses* (Doctoral dissertation). ProQuest LLC.
39. Sessa, di, A.A., & Sherin, B.L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20 (10), 1155–1191. DOI: <http://doi.org/10.1080/0950069980201005>
40. Tanas, J., & Fulmer, G. (2023). A content analysis of alignment messages to the Next Generation Science Standards. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 5 (5), 1–18. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-023-00073-6>
41. Vosniadou, S. (Ed.) (2013). *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed.). Routledge.
42. Wagh, A., Rosenbaum, L.F., Fuhrmann, T., Eloy, A., Blikstein, P., & Wilkerson, M. (2025). Toward ontological alignment: Coordinating student ideas with the representational system of a computational modeling unit for science learning. *Cognition and Instruction*, 43 (1–2), 1–32. DOI: <http://doi.org/10.1080/07370008.2024.2427400>
43. Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92 (5), 941–967. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.20263>
44. Zadorozhnii, V.M. (2024). Using Arduino to develop research competencies of secondary and high school students. *CTE Workshop Proceedings*, 11, 427–441. DOI: <http://doi.org/10.55056/cte.663>
45. Zhang, W., Guan, Y., & Hu, Z. (2024). The efficacy of project-based learning in enhancing computational thinking among students: A meta-analysis of 31 experiments and quasi-experiments. *Education and Information Technologies*, 29, 14513–14545. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10639-023-12392-2>

# MODELLING AS A MEANS OF OVERCOMING STUDENTS' PRE-SCIENTIFIC ALTERNATIVE CONCEPTIONS IN LEARNING NATURAL SCIENCE CONCEPTS

E.G. Ushakova (Moscow, Russia)

## Abstract

*Statement of the problem.* One of the fundamental problems of pedagogical psychology is the persistence of alternative conceptions – pre-scientific, intuitive ideas of students that contradict the system of scientific concepts and demonstrate high resistance to traditional teaching methods. In the theory of learning activity by D.B. Elkonin – V.V. Davydov, modeling is a key means of forming theoretical thinking, but the psychological mechanism by which it overcomes alternative conceptions remains insufficiently revealed.

*The purpose of the article* is to identify and systematize psychological functions of modeling in overcoming students' alternative conceptions in learning natural science concepts.

*Methodology.* The study is a review article with elements of systematization. The analysis covers publications from 1967 to 2025, identified through eLIBRARY.RU, Google Scholar, Scopus and Web of Science databases using the keywords: “modelling”, “alternative conceptions”, “mental models”, “cognitive conflict”, “conceptual change”.

*Research results.* Three psychological functions of modeling are identified: creating conditions for cognitive conflict as a mechanism of conceptual change; visualization of processes inaccessible to direct observation based on sign-symbolic mediation; development of research competencies through the construction and transformation of models. The effectiveness of modeling is determined not by the form of representation (physical, graphical, computer), but by the student's involvement in active transformation of the model and reflection on the limits of its applicability.

*Conclusion.* Modelling performs a triple function: a goal of forming model thinking, a means of cognition, and a form of organizing learning activities. Prospects for further research are related to longitudinal studies of the stability of formed concepts and the development of valid diagnostic tools.

**Keywords:** *modelling, alternative conceptions, mental models, cognitive conflict, learning activity, pedagogical psychology.*

---

**Ushakova, Elena G.** – Senior Lecturer, Directorate of Educational Programs, Moscow City University (Moscow, Russia); ORCID: 0000-0001-5110-4537; Web of Science Researcher ID: AEF-8058-2022; e-mail: babaluba2007@yandex.ru

---

## References

1. Vorontsov, A.B., & Sanina, S.P. (2015). *Deyatelnostnyi podkhod k geograficheskomu obrazovaniyu shkolnikov* [Activity-Based Approach to Geographical Education of Schoolchildren]. Moscow, Russia.
2. Vygotsky, L.S. (2021). Collected Works: In 6 vols. Vol. 3. *Problemy razvitiya psikhiki* [Problems of the Development of the Mind]. Moscow, Russia.
3. Davydov, V.V. (1996). *Teoriya razvivayushchego obucheniya* [Theory of Developmental Teaching]. Moscow, Russia.
4. Nezhnov, P.G., Gorbov, S.F., & Sokolova, O.V. (2018). *Diagnostika uchebno-predmetnykh kompetentsii* [Diagnostics of Educational Subject Competencies]. Moscow, Russia.
5. Chudinova, E.V., Zaitseva, V.E., & Minkin D.I. (2024). Independence and initiative of senior school students in educational modeling. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie* [Psychological Science and Education], 29 (1), 61–74. DOI: <http://doi.org/10.17759/pse.2024290105>
6. Elkonin, B.D., Vorontsov, A.B., & Chudinova, E.V. (2004). Adolescent stage of school education in the Elkonin–Davydov system. *Voprosy obrazovaniya* [Questions of Education], 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podrostkovyy-etap-shkolnogo-obrazovaniya-v-sisteme-elkonina-davydova> (access date: 12.04.2026).
7. Aidoo, B. (2024). A reflective study on adopting inquiry-based science teaching methods. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 6 (29), 1–18. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-024-00119-3>

8. Cheng, X. (2025). Conceptual change in science education: From cold to hot approaches. *Science Insights Education Frontiers*, 26 (1), 4199–4201. DOI: <http://doi.org/10.15354/sief.25.co381>
9. Chi, M.T.H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 61–82). Routledge. DOI: <http://doi.org/10.4324/9780203874813-9>
10. Chung, C.-C., Huang, S.-L., Cheng, Y.-M., & Lou S.-J. (2020). Using an iSTEAM project-based learning model for technology senior high school students. *International Journal of Technology and Design Education*, 10, 905–941. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10798-020-09578-x>
11. Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1041–1053. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416901>
12. Cortés-Morales, A., & Marzabal, A. (2025). The design of science teaching and learning tasks with modelling potential. *Studies in Science Education*, 1 (29). DOI: <http://doi.org/10.1080/03057267.2025.2493990>
13. Craik, K. (1967). *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.
14. Duit, R., & Treagust, D.F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25 (6), 671–688. DOI: <http://doi.org/10.1080/09500690305016>
15. Dunleavy, M., & Dede, C. (2013). Augmented reality teaching and learning. In *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (pp. 735–745). Springer. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5\\_59](http://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_59)
16. Eloy, A., Fuhrmann, T., Wagh, A., de Deus Lopes, R., Wilkerson, M., & Blikstein, P. (2024). Decomposing students' design moves when programming agent-based models. In R. Lindgren, T.I. Asino, E.A. Kyza, C.K. Looi, D.T. Keifert, E. Suárez (Eds.), *Proceedings of the 18th International Conference of the Learning Sciences – ICLS 2024* (pp. 738–745). International Society of the Learning Sciences.
17. Franco-Mariscal, A.J. (Ed.). (2024). *Critical Thinking in Science Education and Teacher Training*. Cham, Springer Nature Switzerland. XXI (Contemporary Trends and Issues in Science Education). DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-031-78578-8>. ISBN 978-3-031-78577-1
18. Fuhrmann, T., Rosenbaum, L.F., Wagh, A., Eloy, A., Wolf, J., Blikstein, P., & Wilkerson, M.H. (2024). Right but wrong: How students' mechanistic reasoning and conceptual understandings shift when designing agent-based models using data. *Science Education*. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.21890>
19. Ga, S.-H., Chang, C.-Y., & Martin, S. (2024). Students' acceptance of Arduino technology integration in student-led science inquiry: Insights from the Technology Acceptance Model. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 1849–1858. DOI: <http://doi.org/10.1109/TLT.2024.3406964>
20. García-Carmona, A. (2023). Argumentation in science education. In R. Gunstone (Ed.), *The International Encyclopedia of Science Education*. Springer.
21. Gilbert, J.K., & Justi, R. (2016). *Modelling-based Teaching in Science Education*, Cham, Springer International Publishing (Models and Modeling in Science Education; Vol. 9). DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3>
22. Gobert, J.D., & Buckley, B.C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 891–894. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416802>
23. Halloun, I.A. (2006). *Modeling Theory in Science Education*. Springer.
24. Harrison, A.G., & Treagust, D.F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1011–1026. DOI: <http://doi.org/10.1080/095006900416809>
25. Johnson-Laird, P. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness*, Cambridge, Harvard University Press.
26. Joolingen, W.R., van Jong, T., de, & Dimitrakopoulou, A. (2024). Physical and digital models in science education. In *International Handbook of Computer-Supported Collaborative Learning*, Springer.

27. Klemencic, E., Ploj, Virtič M., & Majer, Kovačič J. (2023). The role of teacher education in the science literacy development. *Journal of Elementary Education*, 16 (4), 1–22. DOI: <http://doi.org/10.30958/aje.10-4-5>
28. Kotsis, K.T. (2023). Alternative ideas about concepts of physics, a timelessly valuable tool for physics education. *Eurasian Journal of Science and Environmental Education*, 3 (2), 83–97. DOI: <http://doi.org/10.30935/ejsee/13776>
29. Lee, I.A., Sagartz, M., Meyer, P.F., & Anderson, E. (2025). Making sense of models: Connecting science and math through decoding and modifying computational models. *Science Scope*, 48 (2), 39–47. DOI: <http://doi.org/10.1080/08872376.2025.2456246>
30. Lesh, R., & Doerr, H.M. (Eds.) (2003). *Beyond Constructivism: Models and Modeling Perspectives on Mathematics Problem Solving, Learning, and Teaching*. Lawrence Erlbaum.
31. Lin, Y.-H., Lin, H.-C.K., Wang, T.-H., & Wu, C.-H. (2023). Integrating the STEAM-6E model with virtual reality instruction. *Sustainability*, 15 (7), 6269. DOI: <http://doi.org/10.3390/su15076269>
32. Mamaeva, E.A., Utemov, V.V., Abramova, I.V., & Shestakova, L.G. (2024). Enhancing research skills of schoolchildren through 3D modeling. *Perspectives of Science and Education*, 68 (2), 595–613. DOI: <http://doi.org/10.32744/pse.2024.2.36>
33. Markula, A., & Aksela, M. (2022). The key characteristics of project-based learning: how teachers implement projects in K-12 science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 4 (2), 1–17. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-021-00042-x>
34. Papanastasiou, G., Drigas, A., Skianis, C., Lytras, M., & Papanastasiou, E. (2019). Virtual and augmented reality effects on K-12, higher and tertiary education students' twenty-first century skills. *Virtual Reality*, 23 (4), 425–436. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10055-018-0363-2>
35. Piaget, J. (1947). *La représentation du monde chez l'enfant*. Paris, France.
36. Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., & Gertzog, W.A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66 (2), 211–227. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
37. Schwarz, C.V., Reiser, B.J., Davis, E.A., Kenyon, L., Acher, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling. *Journal of Research in Science Teaching*, 46 (6), 632–654. DOI: <http://doi.org/10.1002/tea.20311>
38. Schwarz, C.E. (2024). *Exploring Students' Conceptual and Epistemic Learning in Model-Centered Chemistry Courses* (Doctoral dissertation). ProQuest LLC.
39. Sessa, A.A., di, & Sherin, B.L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20 (10), 1155–1191. DOI: <http://doi.org/10.1080/0950069980201005>
40. Tanas, J., & Fulmer, G. (2023). A content analysis of alignment messages to the Next Generation Science Standards. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 5 (5), 1–18. DOI: <http://doi.org/10.1186/s43031-023-00073-6>
41. Vosniadou, S. (Ed.) (2013). *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed.). Routledge.
42. Wagh, A., Rosenbaum, L.F., Fuhrmann, T., Eloy, A., Blikstein, P., & Wilkerson, M. (2025). Toward ontological alignment: Coordinating student ideas with the representational system of a computational modeling unit for science learning. *Cognition and Instruction*, 43 (1–2), 1–32. DOI: <http://doi.org/10.1080/07370008.2024.2427400>
43. Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92 (5), 941–967. DOI: <http://doi.org/10.1002/sce.20263>
44. Zadorozhnii, V.M. (2024). Using Arduino to develop research competencies of secondary and high school students. *CTE Workshop Proceedings*, 11, 427–441. DOI: <http://doi.org/10.55056/cte.663>
45. Zhang, W., Guan, Y., & Hu, Z. (2024). The efficacy of project-based learning in enhancing computational thinking among students: A meta-analysis of 31 experiments and quasi-experiments. *Education and Information Technologies*, 29, 14513–14545. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10639-023-12392-2>