

УДК 550.31
Рубрика 38.01.00

МЮОНОГРАФИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

MUOGRAPHY AND IT'S APPLICATIONS IN GEOALOGICAL STUDIES

Горбунов Илья Николаевич^{1,3}, Агапитов Дмитрий Дмитриевич²

Gorbunov Ilya Nikolaevich³, Agapitov Dmitrii Dmitrievich²

¹ *Объединенный Институт Ядерных Исследований*

² *ООО «ИГТ-сервис»*

³ *ООО «Дата Аквизишн»*

¹ *Joint Institute for Nuclear Research*

² *LLC «IGT-service»*

³ *LLC «Data Acquisition»*

Введение

Изучение внутренней структуры горных пород – одна из ключевых задач геологии и разведки полезных ископаемых. Традиционно для этого применяются методы исследования бурового керна, анализа естественных и техногенных обнажений (шахты, штольни, карьеры), а также геофизические способы, такие как сейсморазведка, электромагнитные исследования и гравиметрия. Однако эти подходы имеют ряд существенных ограничений, включая недостаточное пространственное разрешение, высокую стоимость, сезонную зависимость и значительные логистические сложности.

В последние годы активно развивается альтернативный метод – мюонная томография, основанный на регистрации потока космических мюонов, проходящих через геологические объекты. Этот подход позволяет получать данные о внутренней структуре пород без необходимости масштабных буровых работ или сложных полевых исследований, что делает его перспективным инструментом для геологоразведочных и инженерных изысканий.

В данной работе рассматриваются принципы мюонной томографии и возможности применения в исследованиях земных недр.

Стандартная модель элементарных частиц и космические мюоны

Современные представления о фундаментальных частицах и их взаимодействиях описываются Стандартной моделью (СМ) [1,2,3] – теоретической конструкцией, которая успешно объясняет три из четырех известных фундаментальных взаимодействий: сильное, слабое и электромагнитное (гравитация в СМ не включена). СМ классифицирует все элементарные частицы на фермионы (составляющие вещество) и бозоны (переносчики взаимодействий). На Рисунке 1 показаны элементарные частицы стандартной модели.

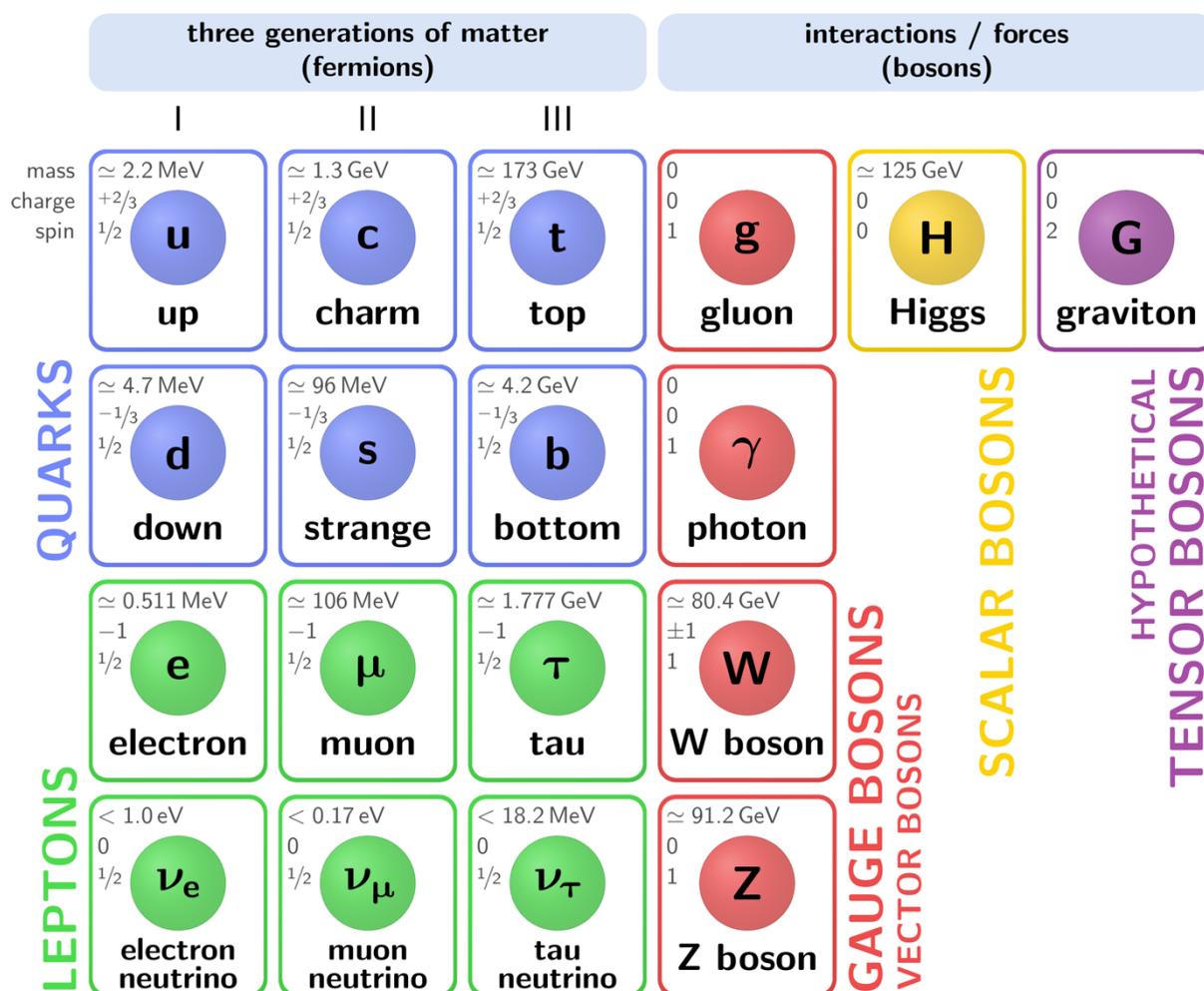


Рисунок 1. Частицы стандартной модели.

Фермионы - строительные блоки материи. Они делятся на две группы:

Кварки – частицы, участвующие в сильном взаимодействии. В природе встречаются шесть типов ("ароматов") кварков, но в составе обычного вещества преобладают верхний (u) и нижний (d) кварки. Именно они образуют нуклоны:

1. Протон = $u + u + d$ (заряд +1)
2. Нейтрон = $u + d + d$ (заряд 0)

Важной особенностью кварков является конфайнмент – они не существуют в свободном состоянии, а всегда связаны в адронах.

Лептоны – частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. К ним относятся, например, электрон (e^-), мюон (μ^-) и нейтрино (ν). В отличие от кварков, лептоны могут наблюдаться как свободные частицы.

Другой тип частиц, присутствующий в природе, бозоны. Это частицы, обеспечивающие взаимодействие между фермионами. В СМ они делятся на:

Калибровочные бозоны:

1. Фотон (γ) – переносчик электромагнитного взаимодействия.
2. W^+ , W^- , Z^0 -бозоны – отвечают за слабое взаимодействие (например, бета-распад).
3. Глюоны (g) – обеспечивают сильное взаимодействие между кварками (квантовая хромодинамика).

Скалярный бозон – бозон Хиггса, ответственный за механизм возникновения массы у частиц.

Космические мюоны образуются в результате взаимодействия высокоэнергетических космических лучей с ядрами атомов атмосферы на высотах порядка нескольких десятков километров (Рисунок 2.). Благодаря высокой энергии (порядка ГэВ) и отсутствию сильного взаимодействия с веществом, мюоны способны проникать вглубь литосферы, достигая глубин в несколько километров.

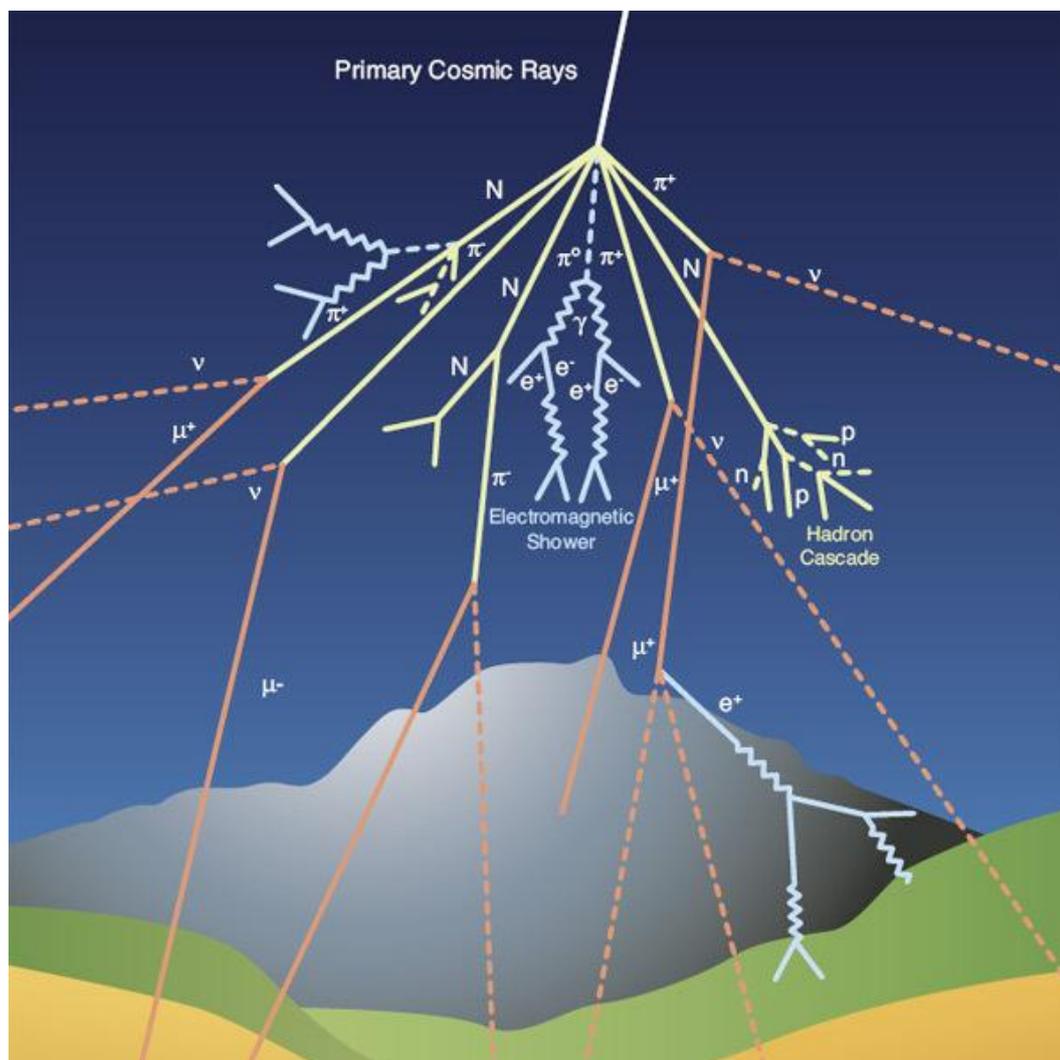


Рисунок 2. Процесс формирования потока космических мюонов.

Поток мюонов на поверхности Земли составляет 150–200 мюонов/м²·с и подчиняется нормальному распределению по углу падения (Рисунок 3.). Это естественное фоновое излучение, не требующее искусственных источников, что делает мюоны удобным инструментом для пассивного зондирования.

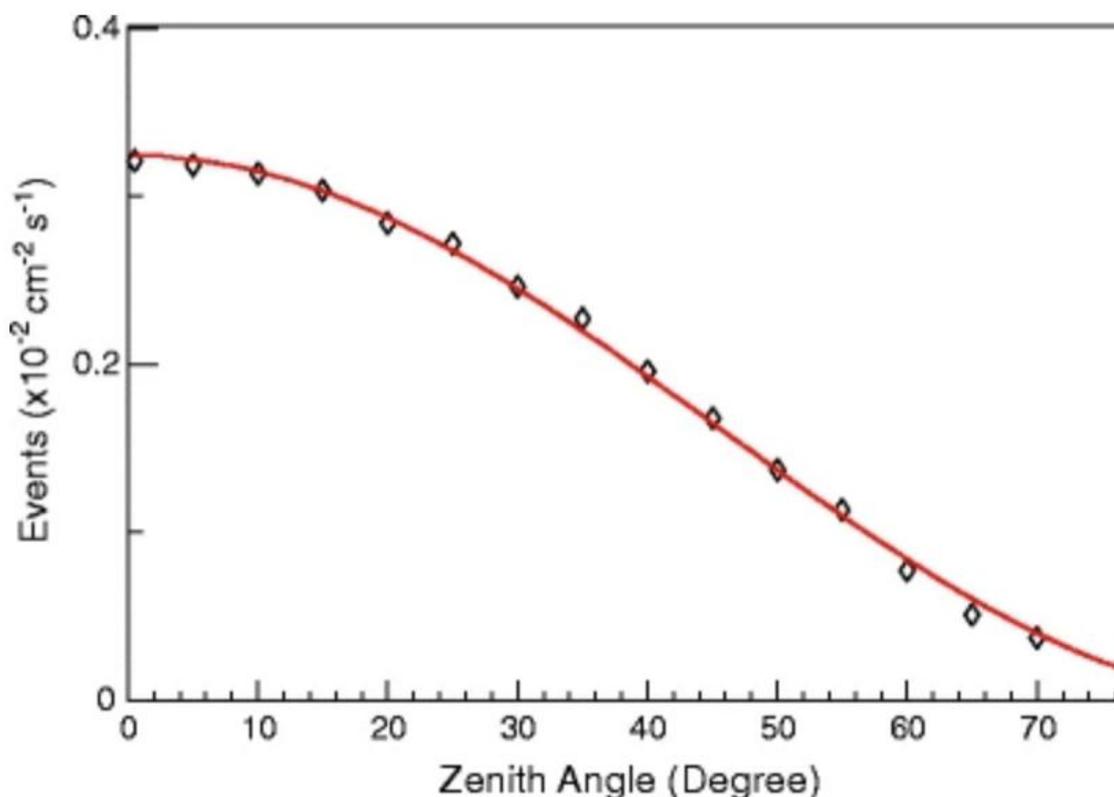


Рисунок 3. Распределение числа мюонов по зенитному углу на поверхности земли.

Основное свойство мюонов, определяющее их применение в геофизических исследованиях, — исключительная проникающая способность. В отличие от других частиц вторичного космического излучения (например, электронов или протонов), мюоны слабо взаимодействуют с веществом, теряя энергию преимущественно за счёт ионизационных потерь и, в меньшей степени, радиационного торможения и ядерных взаимодействий.

Проникающая способность мюонов позволяет им достигать значительных глубин, что делает их эффективным инструментом для изучения: плотностных неоднородностей горных пород, пустот и трещин в геологических структурах, массивных объектов (вулканы, горные массивы).

Измерение ослабления мюонного потока после прохождения через толщу породы позволяет оценить её плотность. Метод основан на зависимости между поглощением мюонов и плотностным составом среды. Этот подход успешно применяется в вулканологии (мониторинг магматических камер), археологии (сканирование пирамид Рисунок 4.), геотехнике (контроль устойчивости горных выработок). Метод не требует искусственных источников излучения, позволяет исследовать объекты километрового масштаба, чувствителен к малым вариациям плотности (до 1–2%).

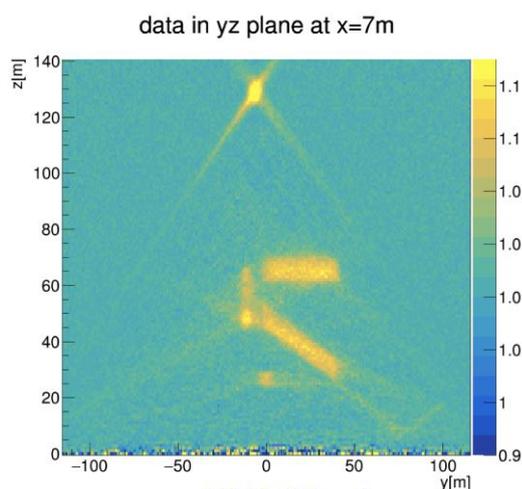


Рисунок 4. Результат сканирования пирамиды Хеопса методом мюонной томографии. Желтые области соответствуют малой плотности. Четко видны галереи и полости.

Таким образом, космические мюоны представляют собой мощный инструмент для неразрушающего зондирования Земли, сочетающий естественность источника с уникальной проникающей способностью.

Применение метода на шахте Заозигоу

В данной главе будет описан опыт применения мюонной томографии для исследования плотности породы на шахте Заозигоу [4], расположенной в провинции Шаньси (Китай). Для изучения внутренней структуры горного массива был применен метод мюонной томографии с использованием космических мюонов.

В ходе эксперимента были установлены шесть детекторов (Рисунок 5.) на основе кремниевых пластин, обеспечивающих высокую точность регистрации мюонного потока. Данные с детекторов обрабатывались с целью построения карты плотностей и выявления аномальных зон.

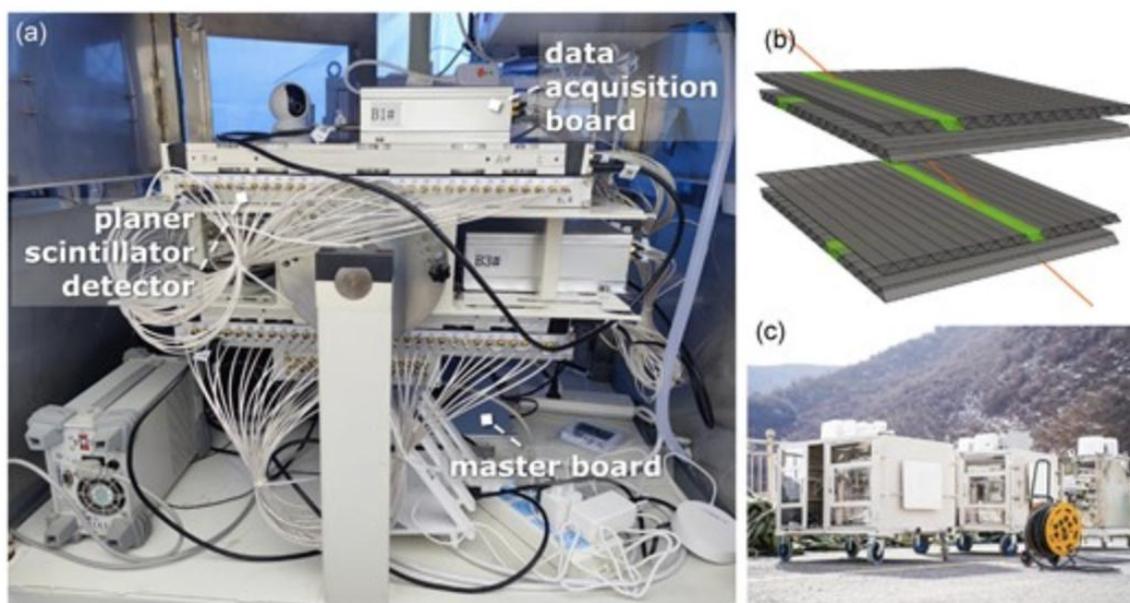


Рисунок 5. Детекторный модуль (слева), принцип определения координат прохождения мюонов кремниевыми пластинами расположенными под углом 90 градусов (справа сверху) и детекторы в сборе (справа внизу)

На основе полученных данных были выделены несколько ключевых областей (Рисунок 6.): В2, В6.2 – модели рудного тела, находящегося в разработке, В3, В6.1 – рудное тело с

неизвестным статусом, требующее дополнительного изучения, B5 – зона, соответствующая сланцевым породам.

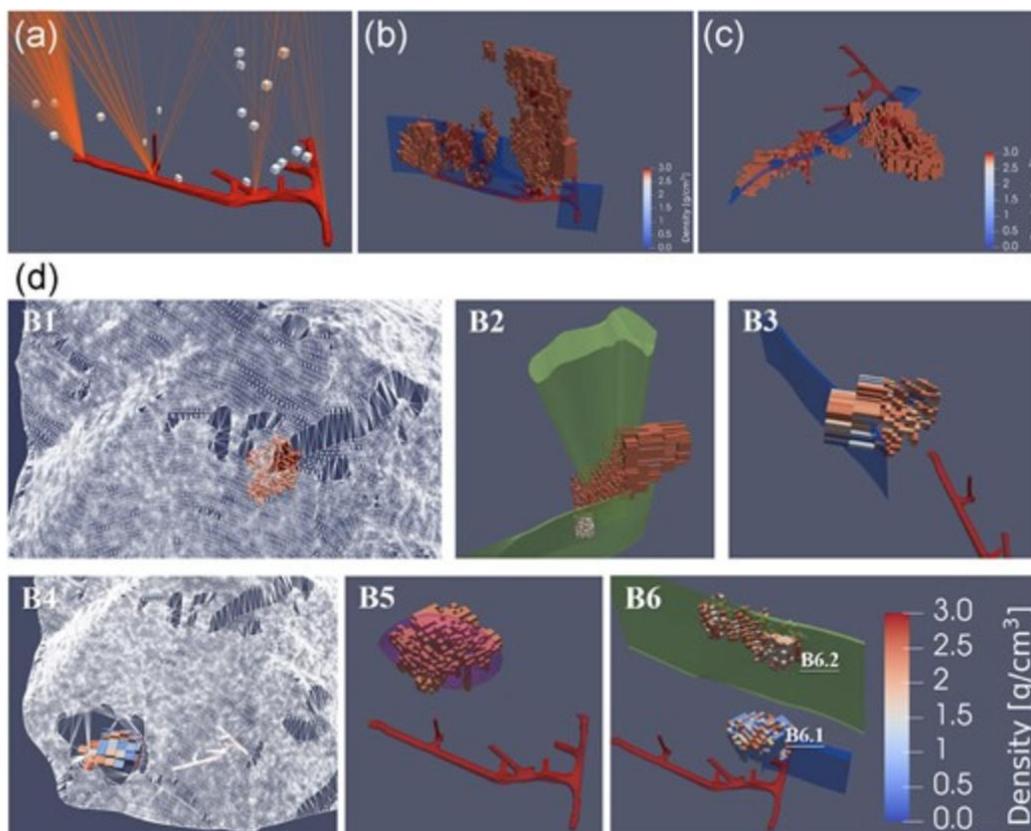


Рисунок 6. B2, B6.2 – модели рудного тела, находящегося в разработке, B3, B6.1 – рудное тело с неизвестным статусом, требующее дополнительного изучения, B5 – зона, соответствующая сланцевым породам

Применение мюонной радиографии позволило успешно идентифицировать зоны с различной плотностью пород в шахте Заозигу. Полученные данные согласуются с известными геологическими моделями (B2, B6.2) и выявляют новые потенциально перспективные участки (B3, B6.1). Дальнейшие исследования с увеличением количества детекторов и продолжительности измерений позволят уточнить структуру рудных тел и оптимизировать горные работы.

Заключение

Мюонная радиография представляет собой перспективный метод неразрушающего контроля, основанный на использовании космических мюонов – естественного, безопасного излучения, не требующего искусственных источников. Благодаря высокой проникающей способности мюонов, данный метод позволяет исследовать плотность крупных объектов, включая горные массивы, археологические сооружения и грузовые контейнеры.

В настоящее время существует несколько технологий детектирования мюонов, однако для эффективного применения в геологоразведочных работах, включая поиск рудных и углеводородных месторождений, требуется разработка специализированных компактных детекторов и усовершенствованных алгоритмов реконструкции данных.

Мюонная томография уже нашла применение в различных областях, таких как археология, логистика и геология, демонстрируя высокую информативность и безопасность. Дальнейшее развитие этого метода, включая повышение точности измерений и автоматизацию обработки данных, позволит расширить его использование в промышленности и науке, обеспечивая новые возможности для разведки полезных ископаемых и мониторинга геологических структур.

К перспективным направлениям можно отнести следующие работы: создание компактных и мобильных детекторных систем, разработка алгоритмов машинного обучения

для ускорения обработки данных, адаптация метода для мониторинга состояния шахт и рудников в реальном времени.

Таким образом, мюонная радиография остается динамично развивающимся направлением, обладающим значительным потенциалом для практического применения в геологии и смежных областях.

Список литературы

1. S.L.Glashow, Nucl.Phys.22(1961),579;
2. S.Weinberg, Phys.Rev.Lett.19(1967),1264;
3. A.Salam in Elementary Particle Physics (Nobel Symp. N.8), Ed. N.Svartholm, Almquist and Wiksells, Stockholm (1968), p.367
4. Guorui Liu et al, Geophysical Journal International, Volume 237, Issue 1, April 2024, Pages 588–603