

УДК 33 DOI: 10.14451/1.242.376

Оценка энергетической эффективности сухопутных транспортных средств, приводимых в движение электродвигателями с питанием от аккумуляторов

© 2025 **Темукуев Тимур Борисович**

Кандидат экономических наук, доцент. Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова, Россия.

E-mail: energoconsul@mail.ru

Ключевые слова: электромобиль, коэффициент полезного действия, груз, полезный груз, снаряженный вес, полный вес, энергия, работа.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с энергетической оценкой транспортных средств, в частности с определением коэффициента полезного действия, который для них определяется как отношение работы, необходимой на перемещение полезного груза, к затраченной энергии. С работой, затраченной на перемещение груза, все предельно ясно, сложности возникают с определением величины израсходованной энергии, особенно для транспортных средств, приводимых в движение электродвигателями с питанием от аккумуляторов. Точная оценка эффективности электромобилей требует учета потерь энергии на различных этапах производственно-технологической цепочки от тепловой электрической станции включительно до тяговых аккумуляторных батарей и всех последующих электромеханических потерь вплоть до ободка движущегося колеса как поэлементно, так и по отдельным блокам, а также в целом.

Введение

Структура энергопотребления в стране и мире быстро меняется. Помимо традиционных потребителей появились новые — это телекоммуникационные системы и связанные с ними технологии, а также производство оборудования для «зеленой» энергетики, призванной уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу. Для достижения поставленных целей предполагается отказаться от использования органического и ядерного топлива во всех сферах народного хозяйства, переключившись на энергию, выра-

батываемую преимущественно на гидравлических, солнечных и ветряных электростанциях, переведя весь транспорт на электрическую тягу или водородное топливо. Цели великолепны, но насколько они реализуемые, и, главное, какой ценой — требуют изучения. На данный момент нет единой методики оценки тех или иных показателей этих систем.

В этой работе рассматривается эффективность использования электроэнергии с энергетической точки зрения.

Территории, где постоянно дуют ветры или много в году солнечных дней, зачастую находятся на значительном расстоянии от мест потребления электроэнергии. Максимальный секундный поток тепловой энергии приходится на площадь круга диаметром 465,1 м на экваторе Земли в ясный день, когда Солнце находится в зените [8], что касается ветров, то они дуют не по установленному графику. Все это принуждает к разработке способов аккумулирования энергии. Их не так много – это электрические аккумуляторы, получение водорода разложением молекулы воды на кислород и водород [10], на реках – гидроаккумулирующие электростанции.

В Российской Федерации (РФ) основные типы электростанций – тепловые (ТЭС), атомные (АЭС), гидравлические (ГЭС), ветряные (ВЭС) и солнечные (СЭС). По данным Росстата [5] выработка электроэнергии в РФ в 2023 году составила 1175,3 ТВт·ч, в том числе ТЭС – 750,2, ГЭС – 202,7, АЭС – 217,4, остальные – 5.

Из отчета о функционировании Единой энергетической системы (ЕЭС) РФ, составленного на основе оперативных данных (без учета территорий новых субъектов РФ), следует, что: выработка и потребление за 2023 год составили, соответственно, 1134,0 и 1121,6 ТВт·ч; структура мощности на 01.01.2024: всего 248 164,88 МВт, в том числе ТЭС – 163 711,96, ГЭС – 50 222,58; АЭС – 29 542,99; ВЭС – 2517,75; СЭС – 2169,60 [1].

В 2022 году потребление электроэнергии составило всего 1 153,6 ТВт·ч, в том числе: промышленные организации – 595,5; сельское хозяйство, лесное хозяйство и охота, рыболовство и рыбноводство – 23,0; строительство – 13,2; торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов – 33,3; транспортировка и хранение – 94,1; деятельность в области информации и связи – 8,3; прочие виды экономической деятельности – 106,7; население – 181,0; потери в электросетях – 98,6 [6]. Ветряные и солнечные электростанции выработали около 2%. Основная часть нагрузки покрывается ТЭС.

Более 75% потребляемой электроэнергии при-

ходится на промышленность, население, транспортирование и хранение. Потери в электросетях составили 8,55%. Замещение транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) на транспортные средства, приводимые в движение тяговыми электрическими двигателями (ТЭД) с питанием от тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), в будущем может серьезно изменить энергетический баланс страны со всеми вытекающими последствиями.

Основная часть

Все существующие транспортные средства – наземные, морские и воздушные – предназначены для перемещения груза, который иногда принято называть полезным. Из первого закона термодинамики следует, что теплота и работа эквивалентны. При превращении тепла в работу часть ее теряется. Для определения безразмерной величины потерь энергии при передаче или преобразовании из одного вида в другой используют такое определение как коэффициент полезного действия (КПД). В первом случае – это отношение величины в конце процесса к ее значению вначале того же процесса; во втором случае – отношение полезной работы к затраченной энергии.

Для транспортных средств – отношение работы, необходимой на перемещение (полезного) груза, к затраченной энергии, т.е. КПД определится из выражения

$$\eta_{\Gamma} = \frac{L_{\Gamma}}{Q_{\Gamma}}, \quad (1)$$

где L_{Γ} – работа, Дж; Q_{Γ} – затраченная энергия, Дж.

Эта та конечная величина, по значению которой следует определять эффективность любого транспортного средства. Однако, здесь все не так очевидно, как кажется. Если с работой, затраченной на перемещение груза, все предельно ясно, то с определением величины затраченной энергии есть проблемы, особенно для транспортных средств, приводимых в движение электродвигателями с питанием от аккумуляторов.

По определению любой КПД всегда меньше еди-

ницы, в противном случае затраченная энергия должна быть равна работе, что противоречит второму закону термодинамики, констатирующим невозможность создания вечного двигателя второго рода.

Различают два веса – снаряженный и полный. Первый – это вес транспортного средства в заводской комплектации, снабженного энергоносителем (органическим или ядерным топливом, тяговыми аккумуляторными батареями); второй – тот же вес, что и первый, плюс груз (полезный), разрешенный производителем.

В общем случае для перемещения тела весом (массой) $G(M)$, кг, из точки **A** в точку **B** нужно затратить работу L , которая постоянна и не связана со временем, и определяется по формуле

$$L = MS \text{ или } L = \frac{G}{g}S, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; S – расстояние между точкам **A** и **B**, м.

Вес тела G и его масса M – связаны между собой вторым законом Ньютона, согласно которому

$$G = Mg, \quad (3)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения на Земле.

Мощность зависит от продолжительности совершения работы. Работа, совершенная некой машиной за единицу времени, т.е. за одну секунду

$$N = \frac{L}{\tau},$$

где τ – время, с.

Груз невозможно переместить без транспортного средства, поэтому вес следует представить так

$$G_{\Pi} = G_c + G_r,$$

где G_{Π} – полный вес, кг; G_c – снаряженный вес, кг; G_r – вес груза, кг

Весовой КПД транспортного средства вычисля-

ется по следующим вариантам одной формулы

$$\begin{aligned} \eta_B &= \frac{G_r}{G_{\Pi}}, \\ \eta_B &= \frac{G_{\Pi} - G_c}{G_{\Pi}}, \\ \eta_B &= 1 - \frac{G_c}{G_{\Pi}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тяговыми электродвигателями снабжены такие наземные транспортные средства как электровозы, трамваи, троллейбусы и электрокары.

Электрокары, как транспортное средство, на промышленных предприятиях стали использовать давно. Электромобиль является его усовершенствованным вариантом, приспособленным для комфортной перевозки людей. Электровозы, трамваи, троллейбусы питаются от электросети, а электрокары – от собственных аккумуляторов. Гибридный автомобиль имеет ДВС, ТЭД и ТАБ. Эта технология отработывалась целое столетие на дизель-электрических подводных лодках.

С изобретением аккумуляторов повышенной емкости (по сравнению со свинцовыми) парк электромобилей в стране и мире увеличивается, что начинает оказывать значительное влияние на нагрузку электрических сетей. Расширяется зона обслуживания электромобилей; в первую очередь строятся электростанции (ЭЭС), являющиеся частью транспортной инфраструктуры. Стандартный состав основных элементов ЭЭС – силовой кабель, зарядное устройство, заправочный кабель. Отбор мощности, как правило, производится на трансформаторной подстанции, где устанавливается сетевой электросчетчик, по которому ЭЭС ведет расчет с поставщиком электроэнергии.

Основные узлы и системы современного электромобиля: зарядный блок, тяговая аккумуляторная батарея, инвертор, тяговый электродвигатель, трансмиссия, 12-вольтовый аккумулятор, система охлаждения (типа теплового насоса), тормозная система. ТЭД могут работать на постоянном и переменном токе. В первом варианте ТЭД

работает без инвертора.

Основные элементы электрической цепи при зарядке: сетевой электросчетчик, силовой кабель, зарядное устройство, зарядный кабель со штекером, зарядный блок, тяговая аккумуляторная батарея, инвертор, ТЭД; 12-вольтный аккумулятор бортового питания.

При снаряженном весе G_c

$$\eta_c = \frac{L_c}{Q_c},$$

где L_c – совершенная работа, Дж; Q_c – затраченная энергия, Дж.

При полном весе G_{Π}

$$\eta_{\Pi} = \frac{L_{\Pi}}{Q_{\Pi}},$$

где L_{Π} – совершенная работа, Дж; Q_{Π} – затраченная энергия, Дж.

Рассмотрим эффективность использования энергии во всех возможных элементах электромеханической цепочки от сетевого электросчетчика до обода движущегося колеса. Электроэнергия в количестве $Q_{сч}$, фиксируемая в точке отбора, направляется на зарядку ТАБ – $Q_{тап}$ и аккумулятора бортового питания – $Q_{абп}$. Часть электроэнергии теряется при зарядке в: Q_1 – силовом кабеле, Q_2 – зарядном устройстве, Q_3 – зарядном кабеле, Q_4 – зарядном блоке. Потери электроэнергии при работе в: Q_5 – тяговой аккумуляторной батарее, Q_6 – инверторе, Q_7 – тяговом электродвигателе; Q_9 – расход энергии на бортовое питание.

Показания счетчика ЭЗС фиксируют количество затраченной электроэнергии на полную зарядку автомобиля

$$Q_{ЭЗС} = Q_{сч} - Q_1 - Q_2.$$

Данный прибор не в состоянии фиксировать потери в зарядном кабеле Q_3 , также как и Q_4 – зарядном блоке, если базовые приборы автомобиля показывают только уровень зарядки ТАБ.

Энергия тяговой аккумуляторной батареи после полной зарядки

$$Q_{тап} = Q_{ЭЗС} - Q_3 - Q_4 - Q_{абп}.$$

Полезная работа

$$L = Q_{сч} - Q_{тап} - Q_5 - Q_6 - Q_7 - Q_8 - Q_9,$$

где $Q_{сч}$ – энергия, затраченная на полную зарядку ТАБ и аккумулятора бортового питания автомобиля, по показаниям электросчетчика в точке присоединения к электросети, Дж; $Q_5 + Q_6 + Q_7$ – суммарная потеря энергии в электрической цепи от ТАБ до ТЭД включительно, Дж; Q_8 – потеря энергии в трансмиссии; Q_9 – расход энергии на бортовое питание.

Коэффициенты полезного действия любого устройства определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{Q_i^{ВЫХ}}{Q_i^{ВХ}}, \quad (5)$$

где $Q_i^{ВХ}$ и $Q_i^{ВЫХ}$ – энергия на входе в устройство и на выходе из устройства.

Для рассматриваемого случая КПД соответственно: η_1 – силового кабеля; η_2 – зарядного устройства; η_3 – зарядного кабеля; η_4 – зарядного блока; η_5 – тяговой аккумуляторной батареи; η_6 – инвертора; η_7 – тягового электродвигателя; η_8 – трансмиссии. КПД или доля затрат на бортовое питание $\eta_9 = \frac{Q_9}{Q_{ЭЗС}}$.

КПД на ободах колес подвижного средства с учетом всех электромеханических потерь от сетевого счетчика определится формулам (5) или (5)

$$\eta_{окпс} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 \eta_7 \eta_8 \eta_9 \quad (6)$$

или

$$\eta_{окпс} = \frac{L}{Q_{сч}}. \quad (7)$$

Электроэнергия используется так же при транспортировке по трубопроводам жидкости и газов.

В международной системе единиц (SI) вес (и вообще сила) измеряется в ньютонах ($1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$), а основной единицей измерения

всех видов энергии, в том числе тепла и работы является джоуль (Дж), представляющий собой работу силы в один ньютон на пути в один метр (1 Дж = 1 Н·м). Поскольку из этого следует, что на поверхности Земли невозможно переместить тело массой в один килограмм на один метр с затратой энергии менее одного джоуля, то эксплуатационный КПД устройства, осуществляющего перемещение любого тела, определится по формуле (1) в вариантах записи (8) и (9)

$$\eta = \frac{MS}{Q}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{GS}{gQ}, \quad (9)$$

где MS – минимальная работа L , необходимая для перемещения тела массой M на расстояние S – то же, что в формуле (2); Q – затраченная энергия, Дж; G – вес тела, кг; g – то же, что в формуле (3).

КПД двигателей, насосов, компрессоров и прочих подобных устройств всех типов зависят от мощности, поэтому их всегда проектируют на какую-то определенную величину, называемую номинальной.

Для транспортных средств оптимальным будет тот КПД, при котором совершается максимальная работа с минимальным расходом энергии. Что в свою очередь зависит от скорости движения, т.е. развиваемой транспортным средством мощности. Оптимальную скорость движения принято называть крейсерской. Технические параметры (мощность, удельный расход энергии и др.), определенные при этой скорости, фиксируются в технической документации.

При определении оптимальных параметров автомобиля расчетный участок, по которому он движется без остановок с крейсерской скоростью, принимается равным его запасу хода.

Технические характеристики автомобилей, заявленные изготовителями, не всегда подтверждаются при тестировании, проводимом во многих странах по заказу издательств специализированных журналов.

За электромобилями следят и в России, где рынок электромобилей достаточно развит. В 2022 году на основе изучения 214 модификаций составили технические характеристики «среднего» электромобиля: вес 1535 кг; мощность 193,7 кВт; емкость тяговой аккумуляторной батареи 51,03 кВт·ч; запас хода (пробег на одной зарядке) 316,9 км; расход электроэнергии на 100 км пути 16,1 кВт·ч [3].

Для вычисления КПД электромобиля формула (9), представляется в следующем виде

$$\eta_{ЭМ} = \frac{G_c S \cdot 10^6}{gQ \cdot 3,6 \cdot 10^6} \text{ или } \eta_{ЭМ} = \frac{G_c S}{35,28Q}, \quad (10)$$

где G_c – вес, т; S – запас хода, км; g – то же, что в формуле (3); $Q_{Тб}$ – емкость тяговой аккумуляторной батареи, кВт·ч.

При вычислении полного КПД электромобиля следует учитывать потери энергии по всей технологической цепочке от теплоэлектростанции до обода движущихся колес

$$\eta_{ПЭМ} = \eta_{ТЭС} \eta_{ЭС} \eta_{ЭСЗ} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_{ЭМ}, \quad (11)$$

где КПД: $\eta_{ТЭС}$ – тепловой электростанции; $\eta_{ЭС}$ – электрических сетей; $\eta_{ЭСЗ}$ – электростанции; $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$ – то же, что в формуле (6); $\eta_{ЭМ}$ – то же, что в формуле (10).

В России из перечисленных показателей на федеральном уровне ежегодно вычисляются и публикуются средние значения КПД для тепловых электростанций и электрических сетей (на 2022 г. соответственно 0,4 и 0,9145).

Расход органического топлива на ТЭС необходимый для полной зарядки ТАБ электромобиля с учетом всех потерь, включая от ТЭС до зарядного устройства, определится по формуле

$$B = \frac{Q_{ТАБ}}{Q_H^P \eta_{ПЭМ}},$$

где B – расход топлива, кг; $Q_{ТАБ}$ – энергия ТАБ, Дж; Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $\eta_{ПЭМ}$ – то же, что в формуле (11).

Полной КПД транспортного средства с ДВС

определяется по формуле (9), которая записывается в следующем виде

$$\eta_{\text{ПДВС}} = \frac{GS}{gV_{100}\rho Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (12)$$

где G – вес транспортного средства, кг; S – протяженность контрольного участка за городом на трассе равная 100 км; g – то же, что в формуле (3); V_{100} – расход топлива в загородном режиме на отрезке g , л; ρ – плотность топлива, кг/м³; Q_{H}^{P} – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Полный КПД транспортного средства с учетом перемещения только полезного груза для: электромобиля

$$\eta_{\text{ПТС}}^{\text{В}} = \eta_{\text{ПЭМ}}\eta_{\text{В}};$$

автомобиля

$$\eta_{\text{ПДВС}}^{\text{В}} = \eta_{\text{ПДВС}}\eta_{\text{В}}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ПЭМ}}$ – то же, что в формуле (11); $\eta_{\text{В}}$ – весовой КПД; $\eta_{\text{ПДВС}}$ то же, что в формуле (12).

В технических характеристиках транспортных средств не указываются, при каком весе и каких погодных условиях определялся расход топлива на 100 км для машин с ДВС, а также запас хода для электромобилей. Надо полагать, что, для получения нужных показателей без нарушения протокола, всегда принимается снаряженный вес, а тестирование проводятся в ясный день при температуре наружного воздуха около 20 °С, когда нет необходимости включать кондиционер для работы, как в режиме охлаждения, так и в режиме отопления.

Машины, оснащенные двигателями внутреннего сгорания, сравнивать с электромобилями можно только по полному КПД, когда они заряжаются электроэнергией, выработанной на ТЭС. Всякое другое сравнение некорректно. Самым показательным будет вариант, когда один и тот же природный газ (условно метан) поступает на ТЭС и автозаправочную станцию. Тогда можно сравнить потребление топлива как электромобилем, так машиной с ДВС на единицу работы.

Ниже представлены показатели современных легковых автомобилей с ДВС, работающих на бензине марки АИ95 плотностью 750 кг/м³ и низшей теплотой сгорания 44 МДж/кг, вычисленные соответственно по формулам (12), (4), (13).

Mercedes-Benz A-Class A 200 DCT Sport: вес 1300/1885 кг, расход топлива – 4,4 л. КПД: полный – 0,0914; весовой – 0,3103; полный с учетом весового – 0,0284.

BMW X1 Модификация 2.0 АТ: вес 1530/2010 кг, расход топлива – 7,9 л. КПД: полный – 0,0599; весовой – 0,2388; полный с учетом весового – 0,0143.

Mercedes-Benz GLC II (X254), внедорожник 5 дв.: вес – 2000/3500 кг, расход топлива – 7,4 л. КПД: полный – 0,0836; весовой – 0,4286; полный с учетом весового – 0,0358.

Два показателя двух электромобилей, вычисленные по формулам (10) и (11), при $\eta_{\text{ТЭС}} = 0,4$; $\eta_{\text{ЭС}} = 0,9145$; $\eta_{\text{ЗЭС}}\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 = 0,956$, соответственно составят для:

«среднего» $\eta_{\text{ЭС}} = 0,2702$ и $\eta_{\text{ПЭМ}} = 0,0944$;

Tesla Model Y 50D kWh, выпускаемого с января 2023 года (вес – 2000 кг, запас хода – 449 км, емкость тяговых батарей – 50 кВт·ч): и *Tesla Model Y 50D kWh*, выпускаемого с января 2023 года (вес – 2000 кг, запас хода – 449 км, емкость тяговых батарей – 50 кВт·ч): $\eta_{\text{ЭС}} = 0,5091$ и $\eta_{\text{ПЭМ}} = 0,1780$.

Полный коэффициент полезного действия легкого автомобиля, оснащенного ДВС, и электромобиля одного класса отличаются, но незначительно. При этом не учитывается расход энергии на изготовление самих транспортных средств.

Относительно углеродного следа. Его оставляют все виды транспортных средств – одни непосредственно, другие опосредованно. Транспортные средства, оснащенные ДВС, выбрасывают в атмосферу диоксид углерода. Утверждения о том, что электромобили не оставляют углеродный след, беспочвенны. Парниковые газы тепло-

вые электростанции выбрасывают в атмосферу непосредственно при сжигании органического топлива, а остальные – при строительстве и изготовлении оборудования.

Выводы

С экономической и энергетической позиций предпочтение должно отдаваться тому транспортному средству, которое затрачивает минимальное количество энергии при перемещении единицы массы полезного груза на единицу пути. Из очевидных действий для уменьшения затрат энергии, помимо всего прочего, необходимо уменьшать снаряженный вес транспортно-го средства путем замены металла на алюминиевые сплавы и композиционные материалы.

При оценке эффективности транспортных средств, приводимых в движение тяговыми электрическими двигателями с питанием от литиевых аккумуляторных батарей, следует поэлементно оценивать потери по всей электрической цепочке от сетевого электросчетчика до тяговых электродвигателей. Поскольку для каждого оборудования они будут разными, для

элементов, неподдающихся приборному учету, величину потерь следует брать по технической документации, если таковая имеется или по аналогам. Технические характеристики, заявляемые производителями на электромобили не всегда корректные, носят рекламный характер, поэтому их, по возможности следует перепроверять, сравнивая данные различных фирм на аналогичное изделие.

Зарядка электромобилей должна производиться постоянным током на электрозаправочных станциях как по техническим причинам, так и потому, что массовое применение однофазных зарядных устройств приведет к разбалансировке электрических сетей со всеми вытекающими последствиями.

У транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания основные потери энергии приходятся на трансмиссию. В настоящее время нет ясности – удастся ли разрешить эту проблему путем усовершенствования гибридных схем автомобилей.

Библиографический список

1. «СО ЕЭС» Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году (на основе оперативных данных). – URL: https://www.bigpowernews.ru/photos/0/0_hFio4JlM1TunVBaSIecnFnm6dqTEdQT1.pdf (дата обр. 27.11.2024).
2. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. – 2017. – № 2. – С. 61–88.
3. Мазурова О. В. Электромобили: проблемы и перспективы // Энергия, экономика, техника, экология. – 2019. – № 12. – С. 33–37.
4. Мы проанализировали 214 электромобилей. – URL: <https://avto-flot.ru/blog/electromobili-statistika.html> (дата обр. 30.11.2024).
5. Обзор данных Росстата по выработке электроэнергии в РФ за 2023 г. – URL: <https://smartlab.ru/company/mozgovik/blog/987455.php> (дата обр. 25.11.2024).
6. Росстат. Промышленное производство в России 2023 : Статистический сборник. – М., 2023. – 105 с.
7. Рынок аккумуляторов. Проблемы утилизации и битва за электромобили будущего. – URL: <https://worldmarketstudies.ru/article/rynok-akkumulatorov-problemy-utilizacii-i-bitva-za-elektromobili-budusego> (дата обр. 07.01.2025).
8. Темукуев Б. Б., Темукуев Т. Б. Об учете парниковых газов в энергетике : Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Часть 1 // . – Нальчик : Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 153–156.
9. Хитрых Д. Электромобили: мировые тренды, проблемы и перспективы // Энергетическая политика. – 2021. – № 1. – С. 22–33.
10. Temukuyev T. B., Prazdnov G. S., Temukuyev B. B. Hydrogen as an alternative planetary fuel: current problems and environmental impact // VI International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development – AGRITECH VI – 2021 (Krasnoyarsk, 18–20 nov 2021) AGRITECH-VI-2021. – DOI: [10.1088/1755-1315/981/3/032091](https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032091).