

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.1;631.482;551.8

ПРИЧИНЫ УНАСЛЕДОВАННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ КРАСНОЦВЕТНЫХ ГРУНТОВ СОВРЕМЕННОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЫЧУАНЬСКОЙ ВПАДИНЫ КИТАЯ

© 2024 г. И. Пэн^{1,*}, И. Ю. Григорьева^{1,**}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии; Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: 354151007pyz@gmail.com,

**E-mail: ikagrig@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята в печать 25.03.2024 г.

В работе на примере западной части Сычуаньской впадины Китая экспериментально оценены и проанализированы особенности состава и свойств красноцветных пород из четырех типичных осадочных толщ мелового и юрского периодов и продуктов их выветривания. Рассчитаны геохимические показатели выветривания (The Chemical Index of Alteration; CIA_{corr}); сделаны выводы о направленности процессов выветривания и причинно-следственной связи между составом и свойствами материнских пород и превышении содержания химических элементов в выветрелых грунтах. Результаты показали, что образцы выветрелых (дисперсных) грунтов довольно схожи с материнскими породами по таким характеристикам, как: цвет, плотность твердого компонента, содержание органического углерода, гранулометрический состав, pH, минеральный состав и содержание основных химических элементов. Результаты расчета CIA_{corr} и анализ треугольных диаграмм A–CN–K показали, что все образцы выветрелых грунтов и материнских пород имеют схожий индекс и характеристики химического выветривания. Кроме того, можно утверждать, что все они достигли умеренной интенсивности химического выветривания, причем интенсивность выветривания образцов из пород мелового возраста (K_1c) значительно выше, чем у образцов, отобранных из пород юрского возраста (J_3p , J_3s , J_2s). Красноцветные породы при выходе на поверхность подвергаются быстрой физической дезинтеграции, а их химическое преобразование слабо выражено. Причиной подобной направленности процесса выветривания является однородная текстура, существенно глинистый состав материнской породы, легко разрушающейся в условиях повышенной влажности и обилия тепла. Незначительное химическое выветривание обусловлено тем, что сама материнская порода в процессе осадконакопления и последующего диагенеза претерпела заметное изменение химического состава и приобрела высокую степень устойчивости к последующему преобразованию в современных условиях. Таким образом, материнские породы в значительной степени определяют состав и свойства красно-желтых ферралитных грунтов.

Ключевые слова: Сычуаньская впадина, красноцветные материнские породы, красно-желтый ферралитный грунт, химический индекс выветривания (CIA)

DOI: 10.31857/S0869780924030057 EDN: SPQXSV

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одним из ключевых требований является оценка экологического состояния территории, в пределах которой осуществляется или планируется тот или иной вид хозяйственной деятельности. Наиболее распространенным методом оценки является геохимический анализ состава депонирующих сред. Наиболее часто в практике исследований проводится анализ природных вод, донных осадков и почв. Последние, как известно, формируются из горных пород в результате выветривания и развития

процессов почвообразования. С позиций грунтоведения почвы, являясь грунтами, представляют собой современную кору выветривания материнских горных пород. Во многом состав, строение и свойства материнской породы будут определять состав, физические и физико-химические свойства грунтов коры выветривания (современных почв). В то же время химические свойства почвы, как правило, отличаются от свойств материнской породы из-за ряда воздействий, происходящих в процессе химического выветривания и диагенеза породы [4].

В пределах Сычуаньской впадины (Китай) широко распространены материнские горные породы, имеющие характерный красный цвет. Они представлены юрскими и меловыми озерно-болотными и аллювиальными осадочными породами. Источником осадочного материала для этих пород являлись в основном древние коры выветривания, состоящие из коллоидного или мелкозернистого материала, представляющего собой палеопочвы [40]. В последующем в ходе осадконакопления палеопочвы были преобразованы под высоким давлением в осадочные породы и цементированы глинистым, кремнистым, железистым и известковым цементом с образованием характерных красноцветных пород, однородных по текстуре и химическому составу. На крутых склонах Сычуаньской впадины в условиях высокой температуры и влажности воздуха в летний период в этих породах широко развивается склоновая эрозия [16].

В условиях современного климата в пределах рассматриваемого региона в результате быстрого выветривания красноцветных пород формируются так называемые красно-желтые субтропические лесные почвы. Эти почвы достаточно широко распространены преимущественно в юго-западной части Сычуаньской впадины. В России этот тип почв известен как желтоземы и красноземы влажных субтропических лесов [1]. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) относит подобный тип почв к категории “Regosol” [10], а министерство сельского хозяйства США (USDA) – к категории “Entisols” [29]. Согласно классификации Китайского национального института стандартизации [6], этот вид почв получил название “Purple soils”. Красно-желтые почвы богаты питательными веществами (особенно фосфором и калием) и считаются “кладом питательных веществ” [15]. В сочетании с высоким уровнем содержания минеральных форм калия [13], красно-желтые субтропические лесные почвы имеют высокую сельскохозяйственную ценность. При этом они подвержены высокому риску подкисления из-за большого содержания глинистых минералов и низкого содержания оксидов Fe/Al [20]. Кроме того, красно-желтые субтропические лесные почвы структурно неустойчивы, из-за чего они сильно подвержены эрозии и потере фосфора [14].

При оценке существующего или допустимого уровня антропогенного воздействия в пределах рассматриваемого региона необходимо иметь четкое представление об особенностях происхождения красно-желтых ферралитных грунтов, а также основных характеристиках их состава и свойств. Подобные оценки делаются, прежде всего, в целях поддержания плодородия почв, формирующихся на этих породах, и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства. Исследованиям в этой

области посвящены многие работы [13–15, 20]. Тем не менее некоторые аспекты в их изучении до сих пор являются дискуссионными либо недостаточно исследованными.

Данная работа посвящена исследованию основных показателей состава и свойств, а также особенностей выветривания красноцветных меловых (K_1c) и юрских (J_3p , J_3s , J_2s) осадочных пород и образующихся в процессе их выветривания современных красно-желтых ферралитных грунтов, залегающих в пределах Сычуаньской впадины.

Цель работы – проанализировать связь между составом и свойствами материнских пород и выветрелых грунтов и выявить причины их унаследованности в процессе выветривания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Сычуанская впадина расположена в южной и центральной частях Азиатского континента ($30^{\circ}30'$ с.ш., $105^{\circ}30'$ в.д.), на западной окраине плиты Янцзы, в области верхнего течения р. Янцзы. Бассейн р. Янцзы – один из четырех крупных бассейнов Китая, простирается на 1000 км с востока на запад и на 500 км с севера на юг, его общая площадь составляет 1.8×10^5 км². Климат здесь субтропический муссонный, с выпадением обильных дождей и высокими температурами воздуха. Причем высокие температуры и основная часть осадков приходятся на период с июня по сентябрь, а среднегодовая температура и количество осадков составляют 14–19°C и 1000–2000 мм соответственно. В бассейне широко распространены мезозойские триасовые, юрские и меловые красноцветные породы, которые обнажаются на поверхности и имеют явные следы выветривания с образованием красно-желтых субтропических лесных почв. В данном исследовании основное внимание уделяется нижнемеловому осадочному слою K_1c (формация Канси), верхнеюрскому осадочному слою J_3p (формация Пэнлайчжэнь), J_3s (формация Суйнинга) и среднеюрскому осадочному слою J_2s (формация Шаксимяо). Слой выветрелого дисперсного грунта, как правило, маломощный, обычно не более 1.2 м. За счет интенсивной эрозии под действием текучих вод выветрелый слой быстро обновляется, т.е. почвы находятся на ранних стадиях своего формирования.

Отбор проб. Районы для опробования красноцветных пород и продуктов их выветривания в пределах Сычуаньской впадины были выбраны на основе геологической карты Китая масштаба 1 : 200 000 [28], карты распространения типов почв в Китае [11], а также исходя из характерных визуальных признаков данных пород (цвета, текстуры). Проведено предварительное обследование и скрининг районов распространения исследуемых пород по данным Google Earth. Исключены



Рис. 1. Морфология анализируемых образцов: нижнемеловых K_{1c} (формация Канси), верхнеюрских J_{3p} (формация Пэнлайчжэнь), J_{3s} (формация Суйнинга) и среднеюрских J_{2s} (формация Шаксимяо) отложений.

участки, интенсивно затронутые антропогенной деятельностью, и выбраны только участки в пределах лесных и реже сельскохозяйственных угодий. На обследованных территориях в случайном порядке были определены точки отбора проб, в каждой из которых был снят верхний слой 0–20/30 см, чтобы максимально исключить возможное влияние антропогенного воздействия (в особенности на химический состав отбираемых образцов). В итоге было выбрано 25 точек отбора, пробы отбирались с двух интервалов: 20–50 и 50–80 см. Всего было отобрано 25 образцов невыветрелых (материнских) пород и 25 образцов выветрелого грунта (рис. 1). Из них, соответственно, по 6 образцов пород из нижнемеловых отложений K_{1c} , по 7 – из верхнеюрских отложений J_{3p} , по 5 – из верхнеюрских отложений J_{3s} и по 7 – из среднеюрских отложений J_{2s} . Расположение точек отбора проб показано на рис. 26.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Инструментальные исследования. Плотность твердого компонента отобранных образцов определялась пикнометрическим методом [32], содержание органического углерода по методу И.В. Тюрина [2], pH потенциометрическим методом [34], содержание $CaCO_3$ методом титрования [33]. Гранулометрический состав образцов материнских горных пород определялся ситовым и ареометрическим методом [6]; выветрелых грунтов – пипеточным и ареометрическим методом [35]. Минеральный состав был определен методом рентгеновской дифрактометрии на кафедре

инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова¹. После соответствующей подготовки образцов проводилось их насыщение магнем и этиленгликолем, с последующим нагреванием до 350°C. Глинистые минералы в ориентированном образце исследовались методом рентгеновской дифракции с использованием монокроматических $CuK\alpha$ -лучей. Интерпретация дифракционной картины проводилась в соответствии с методикой Brindley и Brown [8], а количественный анализ – путем полносекционной обработки неориентированных рентгенограмм по методу Ритвельда.

Элементный состав образцов изучался различными методами на кафедре геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова². Для обеспечения достоверности данных основные химические элементы (Si, Al, Fe, Ti, Mn, Ca, Mg, K, Na, P) в образцах определялись одновременно тремя методами:

1) с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре

¹ Анализ проведен и обработан С.А. Гариной и С.В. Закусным в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счет средств развития Московского университета.

² Анализ проведен и обработан Т.Н. Лубковой в лаборатории геохимии кафедры геохимии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счет средств развития Московского университета.

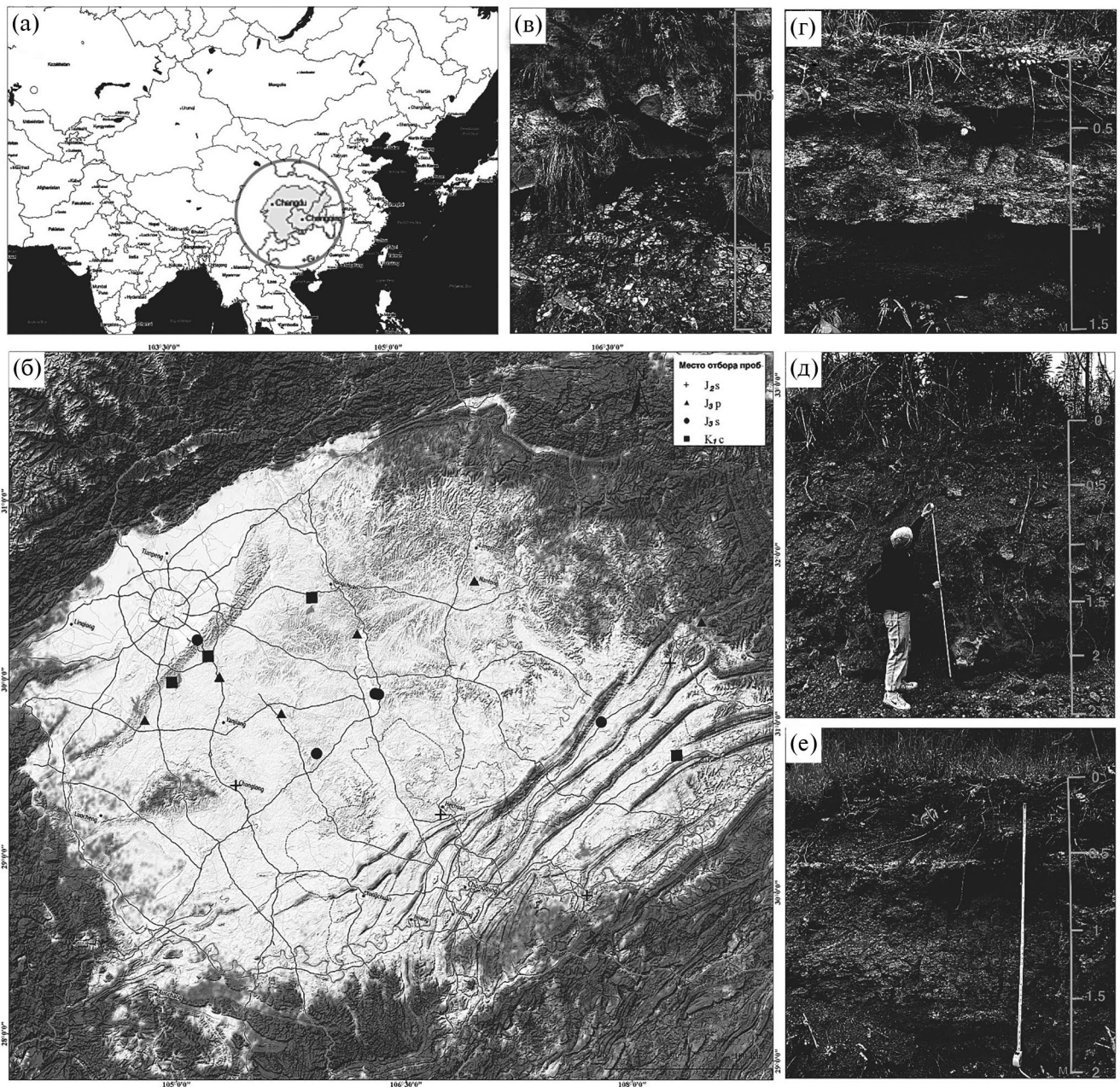


Рис. 2. Расположение точек отбора проб и профили выветрелых толщ, сформированных на красноцветных верхнемеловых и юрских отложениях: а – расположение Сычуаньской впадины на территории Китая (изучаемая часть региона выделена светло-серым); б – точки отбора проб в пределах Сычуаньской впадины: квадраты (K_{1c}), круги (J_{3p}), треугольники (J_{3s}) и крестики (J_{2s}) – места отбора проб из соответствующих отложений. Опробуемые профили в пределах отложений: в – нижнемеловых K_{1c} (формация Канси); г – верхнеюрских J_{3p} (формация Пэнлайчжэнь); д – верхнеюрских J_{3s}; е – среднеюрских J_{2s} (формация Шаксимяо).

ELAN-6100 после микроволнового сбраживания поликислоты (HF + HCl + HNO₃);

2) посредством микроволнового сбраживания поликислоты (HF + HCl + HNO₃) с использованием оптико-эмиссионного спектрометра Agilent 5110 для анализа методом фотоэмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой;

3) методом энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции на приборах Thermo Niton FXL-950 и XL5 после продувки гелием.

Разница результатов, полученных при использовании каждого из трех методов, была проанализирована с целью исключения данных, отличающихся более чем на 10%, а для данных с разницей не более 10% принималось среднее значение.

Графики распределения строились с использованием ArcGis и Corel-DrawX5, остальные графики после построения в Excel и Origin 8.0 обрабатывались с помощью Corel-DrawX5. Статистический анализ проводился с помощью программы SPSS 11.0.

Таблица 1. Формулы, относящиеся к показателям химического выветривания

Индикаторы выветривания и их аббревиатуры	Расчетная формула	Литературный источник
Химический индекс выветривания (CIA_{corr})	$CIA_{\text{corr}} = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O^*)]$	Nesbit and Young, 1982 [24]
Индекс изменчивости состава (ICV)	$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O_{\text{corr}} + Na_2O + CaO^* + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$	Cox, 1995 [7]
К-метаморфизм (K_2O)	$K_2O^* = m \times (Al_2O_3) + m / (1 - m) \times [(CaO^*) + (Na_2O)]$, где $m = K_2O / [(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$	Panahiet al., 2000 [26]

Примечание. Содержание каждого элемента относится к его молярной доле, CaO^* – к CaO в силикатах, т.е. к молярной доле CaO во всей породе за вычетом химически осажженного CaO , рассчитанной по формуле ($CaO^* = CaO - 10/3 \times P_2O_5$). Далее сравнивается величина скорректированных молярных долей CaO и Na_2O , и принимается меньшая молярная доля за молярную долю CaO^* [21].

Расчет геохимических индикаторов выветривания. Для оценки степени выветривания (изменения) материнских пород наиболее распространенным показателем является химический индекс выветривания (The Chemical Index of Alteration, (CIA)), предложенный Н.В. Nesbit и G.M. Young [23–25] при изучении палеопротерозойских литотипов гуронской супергруппы с использованием геохимических методов по объемному процентному содержанию минералов в составе коры выветривания. Согласно рекомендациям вышеназванных авторов, при количественной оценке CIA и установлении условий палеоклимата на изучаемой территории следует принимать во внимание, что материнский материал мог быть неоднородным, поэтому необходимо учитывать также влияние некоторых других геологических факторов. В процессах переноса, осадконакопления и диагенеза обломочных пород в палеосреде происходит изменение состава исходных пород, наиболее заметными признаками которого являются сортировка по размеру и составу зерен, седиментационная дифференциация, переотложение, дополнительное выветривание в зоне осадконакопления и К-метаморфизм в процессе диагенеза. Чтобы гарантировать точность значений CIA при оценке уровня выветривания в исходной области, при отборе экспериментальных образцов следует обеспечить выполнение следующих условий.

А. Использование аргиллита в качестве объекта исследования. Чтобы исключить седиментационное расслоение, следует по возможности выбирать для изучения илистые мелкообломочные породы, где можно проследить состав исходной породы. Осадочное расслоение, происходящее при переносе и отложении продуктов выветривания материнской породы, может привести к тому, что в песчанике сохранится относительно небольшое количество глинистых минералов, что обусловит низкие расчетные значения CIA. Поэтому рассчитанные по песчаникам значения CIA

несопоставимы со значениями, рассчитанными по аргиллитам, т.е. степень выветривания в районе источника не может быть проанализирована по критериям, полученным для аргиллитов. Кроме того, по мнению некоторых исследователей, аргиллиты лучше других обломочных пород подходят для изучения степени выветривания и палеоклимата из-за их более высокой степени однородности и низкой проницаемости, что позволяет лучше сохранять информацию о районе источника сноса [12, 37].

Б. Отбор образцов первого осаджения ($ICV > 1$). Состав обломочных пород в более древних слоях часто изменяется в результате переотложения осадков, поэтому важно различать переотложение пород с помощью индекса изменчивости состава (ICV). Если для обломочных пород $ICV > 1$, то это свидетельствует о том, что они содержат мало глинистых минералов, представляя собой первое осаджение в тектонически активной зоне [18]; значение $ICV < 1$ означает, что порода содержит большое количество глинистых минералов, а значит, она могла быть переотложена или впервые отложена в условиях сильного химического выветривания [5].

В. Корректировка получаемых значений геохимических индикаторов выветривания. К-метаморфизм (метасоматизм калия в процессе диагенеза) в тонкообломочных породах в процессе диагенеза может приводить к добавлению новых К-элементов и изменению исходного состава пород, что обуславливает низкие значения CIA, поэтому необходима корректировка. Она может быть сделана либо по методу диаграммы А–СН–К, предложенному Н.В. Nesbit и G.M. Young [25], либо по формулам поправок [24–26]. В данной работе корректировка значений проводилась по расчетным формулам (табл. 1).

Таблица 2. Состав и свойства изучаемых образцов красноцветных отложений в пределах Сычуаньской впадины Китая

Стратиграфический индекс	Количество образцов, n	Плотность твердого компонента, г/см ³	Содержание органического углерода, %	pH	Содержание карбонатов (CaCO ₃), %	Гранулометрический состав, %			
						размер фракций, мм			<0.002
						2–0.2	0.2–0.02	0.02–0.002	
K _{1c}	МП	2.45 ± 0.03	1.14 ± 0.23	8.63 ± 0.28	28.53 ± 4.82	2.05 ± 0.91	41.86 ± 5.63	38.85 ± 2.46	19.23 ± 4.32
	ВГ	2.41 ± 0.05	0.91 ± 0.14	8.67 ± 0.23	29.80 ± 3.90	0.91 ± 0.08	40.04 ± 4.38	39.91 ± 5.44	19.14 ± 1.05
J _{3p}	МП	2.40 ± 0.03	0.87 ± 0.15	8.47 ± 0.04	5.95 ± 1.06	1.83 ± 0.64	35.57 ± 3.85	29.57 ± 0.87	33.53 ± 1.63
	ВГ	2.48 ± 0.02	0.85 ± 0.13	8.53 ± 0.12	6.55 ± 0.21	2.34 ± 0.13	29.65 ± 0.07	32.27 ± 0.12	35.72 ± 0.11
J _{3sn}	МП	2.44 ± 0.02	0.91 ± 0.21	8.81 ± 0.26	9.20 ± 2.31	1.51 ± 0.15	28.15 ± 0.09	38.14 ± 0.32	32.21 ± 1.56
	ВГ	2.44 ± 0.03	0.94 ± 0.19	8.83 ± 0.27	14.00 ± 1.39	2.44 ± 0.07	24.26 ± 0.06	39.09 ± 0.76	34.21 ± 1.41
J _{2s}	МП	2.46 ± 0.06	1.65 ± 0.34	8.40 ± 0.12	1.10 ± 0.98	1.52 ± 0.50	26.73 ± 4.03	36.25 ± 1.53	35.50 ± 3.00
	ВГ	2.49 ± 0.04	1.32 ± 0.21	8.44 ± 0.27	1.75 ± 0.49	1.13 ± 1.08	37.62 ± 0.54	31.46 ± 2.19	29.79 ± 0.57
Критерий Стьюдента для парных выборок	T-тест	0.574	1.064	1.057	–0.147	1.086	–	–	–1.329
	Sig	0.584	0.382	0.325	0.887	0.314	–	–	0.225

Примечание. МП – соответствует значениям для материнских пород; ВГ – для выветрелых грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав и свойства красноцветных пород и продуктов их выветривания

Как было отмечено выше, отложения осадочных пород изучаемых горизонтов (K_{1c}, J_{3p}, J_{3sn} и J_{2s}) образуют в разрезе однородный профиль без существенной стратификации. Разрез нижнемеловых пород K_{1c} представлен красновато-желтым, массивным, мелкозернистым, полевошпатовым песчаником, переслаивающимся с известковым конгломератом (см. рис. 2б), а грунт, образовавшийся в результате его выветривания, в целом красновато-желтый с мелкими, отчетливо заметными белыми зернами и ярко выраженной рыхлостью. Породы верхней юры J_{3p} представлены кирпично-красными аргиллитами, алевролитами, неравномерно переслаивающимися с фиолетово-красными, серовато-белыми, толстослоистыми, массивными, мелкозернистыми полевошпатовыми песчаниками и полевошпатовыми кварцевыми песчаниками, с прослоями серовато-белого тонкослоистого известняка в средней части и желтовато-зеленого сланца в верхней части (см. рис. 2г). Грунт, образовавшийся в результате выветривания, преимущественно коричнево-красного цвета, уплотненный, глинистый, крупнозернистый, с выраженными разноразмерными и неоднородными включениями. Профиль пород верхнеюрской толщи J_{3sn} состоит из красновато-бурых аргиллитов, песчаных аргиллитов, бледно-красных тонкослоистых алевролитов и промежуточных мелкозернистых полевошпатовых песчаников в верхней и средней частях профиля опробованной толщи пород, изредка серовато-зеленых тонкослоистых мергелей в нижней части (см. рис. 2д), а сформированные из этой породы дисперсные грунты имеют в основном красновато-бурый цвет, мелкозернистую и плотную структуру, однородный профиль без явной стратификации. Что касается пород среднеюрского возраста J_{2s}, их профиль в разрезе представлен светло-фиолетово-красным и желтовато-серым плотнослоистым массивным мелкозернистым песчаником, переслаивающимся с красными и желтовато-серыми песчанистыми аргиллитами и алевролитами (см. рис. 2е). Грунт, сформированный при выветривании этой породы, в целом имеет серо-коричневый цвет, грубую глинистую текстуру с присутствием отчетливых неровных агрегатов. В совокупности разновозрастные породы и образованные при их выветривании грунты, хотя и различаются по своим морфологическим характеристикам, но однородны по профилю и не имеют явной стратификации.

Плотность твердого компонента, pH, содержание органического вещества и CaCO₃, гранулометрический состав. В табл. 2 приведены результаты исследования материнских и выветрелых пород нижнемелового K_{1c}, верхнеюрского J_{3p}, J_{3s} и среднеюрского осадочного горизонта J_{2s}.

Таблица 3. Минеральный состав анализируемых материнских пород (МП) и перекрывающих их выветрелых грунтов (ВГ)

Стратиграфический индекс	Тип образца	Смектит + /С*	Иллит	Каолинит	Кварц	Плагиоклазы (альбит)	КПШ (микроклин)	Кальцит	Гематит	Нахколит
K _{1c}	МП	18.8	7.2	1.2	21	1.5	5.8	42.9	1.2	0.4
	ВГ	20.4	6.8	1	24.3	1.1	7.8	36.5	0.6	1.5
J _{3p}	МП	20.2	13.4	2.7	38.3	7.8	9.9	4.6	1	2.1
	ВГ	20.4	13.2	2.1	37.4	12	9.1	5	0.8	—
J _{3s}	МП	20.2	22.9	5	27.1	14.4	—	6.7	1.3	2.4
	ВГ	18.4	21.6	5	28.3	15.1	—	8.1	1.3	2.2
J _{2s}	МП	18.3	21.2	3.4	27.5	15.8	8.3	—	0.7	1.8
	ВГ	19.8	23.6	4.2	28.1	12.3	7.7	0.4	1.3	2.6

*С — смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно вермикулит-смектит.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что материнские породы и вышележащие грунты имеют очень близкие значения плотности твердого компонента, pH, содержания CaCO₃ и гранулометрического состава. Так, породы и перекрывающие их грунты характеризуются преимущественно щелочной реакцией среды pH 8.47–8.83; плотность твердого компонента в них составляет 2.40–2.49 г/см³; содержание органического углерода — 0.85–1.65%. Содержание CaCO₃ в выветрелых грунтах и породах сильно различается в зависимости от возраста: наибольшее среднее содержание CaCO₃ отмечается в грунтах/породах — 28.53/29.80% в нижнемеловых отложениях (K_{1c}), а наименьшее — 1.10/1.75% в образцах среднеюрских пород (J_{2s}). Гранулометрический состав пород в основном зависит от дигенетических преобразований. Содержание песка (2–0.02 мм) в породах K_{1c}, J_{3p}, J_{3s}, J_{2s} и вышележащих грунтах составляет от 1.13 до 2.44%, содержание пылеватых зерен (0.02–0.002 мм) — 28.57–39.91%, глинистых частиц (<0.002 мм) — 19.14–35.50% (обозначения размерных фракций приведены по данным [22]).

Все образцы были разделены на две группы: “материнские горные породы” и “выветрелые грунты”. По всем показателям проведена статистическая обработка данных и получены соответствующие критерии (см. табл. 2). Результаты показали, что все породы и вышележащие грунты статистически не различались по плотности твердого компонента, содержанию органического углерода, pH, содержанию CaCO₃, песка (2–0.02 мм) и пылевой фракции (0.02–0.002 мм). Все величины анализируемых параметров были

значимо коррелированы и не имели существенных различий ($p < 0.05$). Это свидетельствует о том, что красно-желтый ферралитный грунт имеет значительную унаследованность от материнской породы.

Минеральный состав. В табл. 3 приведены данные о минеральном составе материнских пород K_{1c}, J_{3p}, J_{3s}, J_{2s} и перекрывающих их выветрелых образований. Видно, что в основном они состоят из монтмориллонита, иллита, каолинита, кварца, плагиоклаза, гематита, кальцита и нахколита, за исключением образцов из J_{3p}, все остальные горизонты содержат натриевый полевой шпат.

При этом наблюдаются существенные различия в содержании основных минералов в материнских породах и вышележащих выветрелых грунтах. Так, в образцах из отложений K_{1c} наибольший процент минералов приходится на кальцит, далее следуют кварц, монтмориллонит и иллит, причем содержание кальцита (31.8–38.1%) значительно выше, чем в образцах из других опробованных толщ. Минералы с более высоким процентным содержанием в образцах из отложений (J_{3p}, J_{3s}, J_{2s}) представлены в основном кварцем, монтмориллонитом и иллитом.

Минеральный состав и содержание минералов в образцах материнских пород и вышележащих выветрелых грунтов, взятых из осадочных слоев одного возраста из разных мест, в целом близки, но все же имеются незначительные различия. Можно предположить, что образцы из разных регионов могли подвергнуться разной степени выветривания в один и тот же период, что тесно связано с палеоэкологическими условиями. Еще

Таблица 4. Содержание основных оксидов в материнских породах и перекрывающих их красно-желтых ферралитных грунтах

Осадочный слой	Тип	n	%										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	ППВ
K _{1c}	МП	6	45.35	8.83	2.81	0.35	0.06	20.62	1.19	1.48a	0.60	0.07	19.00
	ВГ	6	46.16	8.21	3.32	0.30	0.06a	19.26	1.00	1.48a	0.62	0.06	17.90
	Ср	12	45.76	8.82	3.06	0.32	0.06a	19.94	1.09	1.48	0.61a	0.07	18.43
J _{3p}	МП	7	66.53	14.12	5.10	0.66	0.09	4.71	1.89	2.72	1.33	0.15	8.75
	ВГ	7	66.13	14.27	5.18	0.67	0.09a	4.82	1.92	2.71	1.37	0.15	8.45
	Ср	14	66.33	14.20	5.14	0.67	0.09	4.76a	1.90	2.71	1.35	0.15	8.62
J _{3s}	МП	5	60.30	15.78	6.30	0.74	0.10	7.32	2.48	3.05	1.31	0.19a	9.73
	ВГ	5	58.55	15.83	6.44	0.74	0.10	8.00	2.71	2.78	1.23	0.19	11.71
	Ср	10	59.42	15.80	6.37	0.74	0.10	7.66	2.59	2.92	1.27a	0.19	10.72
J _{2s}	МП	7	70.65	14.29	5.31	0.71	0.11	1.47	1.71	2.40	1.39	0.16	4.75
	ВГ	7	68.42	14.83	5.73	0.70a	0.08	1.49	2.04a	2.54	1.23	0.15	6.70
	Ср	14	69.54	14.56	5.52	0.70	0.09a	1.48	1.87	2.47	1.31	0.15	5.75
Критерий Стьюдента для парных выборок	Т-тест	25	−1.516	−0.015	1.626	−0.717	−1.527	−0.56	1.24	−0.18	−0.941	−0.536	0.434
	Sig	25	0.143	0.988	0.117	0.48	0.14	0.581	0.227	0.858	0.356	0.597	0.678
UCC	−	−	66.00	15.20	5.00	0.50a	0.06	4.20	2.20	3.40	3.90	0.50	−

Примечание. МП — соответствует значениям для материнских пород; ВГ — для выветрелых грунтов, Ср — среднее значение; буквой “a” обозначены кластеры, которые статистически различаются ($p > 0.05$); UCC — среднее содержание в верхней части континентальной земной коры; ППВ — потери при воспламенении.

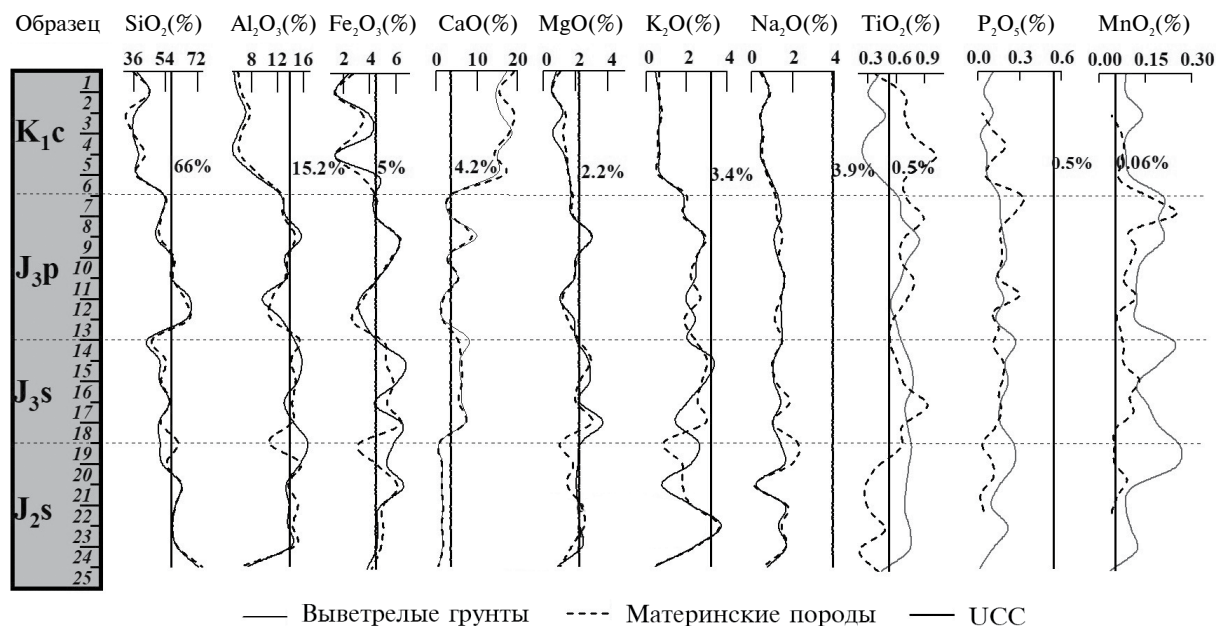


Рис. 3. Обобщенные профили содержания основных оксидов в анализируемых образцах из осадочных горизонтов K_1c , J_3p , J_3s , J_2s . Цифрами по вертикали обозначено общее количество образцов.

раз подчеркнем, что касается образцов выветрелой породы и вышележащей толщи того же периода, то они очень близки по минеральному составу к материнским породам.

Содержание основных оксидов. В табл. 4 приведены значения содержания основных химических элементов в исследованных образцах, а также средние значения основных элементов, содержащихся в верхней части континентальной земной коры [31].

Согласно полученным результатам, породы четырех различных геологических эпох (K_1c , J_3p , J_3s , J_2s) и современные продукты их выветривания имеют наибольшее процентное содержание оксида кремния (SiO_2), средние значения которого варьируют от 45.35 до 70.65%. За ним следует Al_2O_3 или CaO . Средние значения Al_2O_3 изменяются от 8.21 до 15.83%. Содержание CaO в образцах разного геологического возраста варьируют в довольно широких пределах. Так, средние значения изменяются от 1.47 до 20.62%. Среднее содержание Fe_2O_3 колеблется (в %) от 2.81 до 6.44; K_2O — от 1.48 до 3.05; MgO — от 1.00 до 2.71; Na_2O — от 0.60 до 1.39; TiO_2 — от 0.30 до 0.74; P_2O_5 — от 0.06 до 0.19; MnO_2 — от 0.06 до 0.11. Сравнивая изменение содержания основных элементов в материнских породах и вышележащих грунтах (рис. 3), можно отметить, что кривые изменения содержания SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O и P_2O_5 в породах и выветрелых грунтах разного возраста с высокой степенью согласованности повторяют друг друга. Содержание TiO_2 и MnO_2 в материнских породах и продуктах их выветривания не всегда одинаково и имеет небольшой диапазон

варьирования, причем в большинстве горизонтов содержание TiO_2 и MnO_2 в выветрелых разностях выше, чем в материнских породах, что может быть связано с накоплением щелочных металлов в процессе выветривания пород [14].

За исключением образцов из верхнемеловых отложений (K_1c), а также содержания Na_2O и K_2O в каждом из анализируемых типов отложений, характер распределения основных элементов практически одинаков и близок к среднему составу в верхней части континентальной земной коры (UCC composition). Таким образом, основной элементный состав пород из юрских отложений и продукты их выветривания близки к UCC, а элементный состав образцов из верхнемеловых отложений существенно отличается от UCC.

Согласно предыдущим исследованиям [38], исходным материалом в целом для формирования изучаемых пород (J_3p , J_3s и J_2s) в пределах Сычуаньской впадины могли быть кварцевые отложения фельзитовой зоны, однако происхождение материнских пород в осадочном слое K_1c может отличаться от происхождения других отложений. Это, вероятно, связано с тем, что в процессе формирования данного типа отложений при палеоклиматических условиях процесса осадконакопления, заметно ощущалось воздействие “экзотического” материала выветривания, принесенного из отдаленных районов, что привело к иной структуре распределения основных элементов, чем в других группах образцов и UCC.

Во всех образцах материнских пород и продуктов их выветривания анализируемых толщ содержание Na_2O и K_2O ниже, чем в UCC.

В большинстве образцов содержание Fe_2O_3 выше, чем в УСС. В то время как в образцах из K_1c содержание Fe_2O_3 близко к УСС. Это объясняется миграцией щелочных металлов и их оксидов и постепенным накоплением Fe и других стабильных элементов в процессе выветривания. Результаты проведенного нами анализа подтверждают выводы Y.R. He [15] о том, что красноцветные породы и продукты их выветривания имеют относительно высокое содержание Fe, Mn и Ti (см. рис. 3).

Результаты статистической обработки данных (см. табл. 3) показали, что элементные составы, как материнских пород, так и продуктов их выветривания значимо коррелируют и не имеют существенных различий ($p < 0.05$). Приведенный выше анализ показывает, что содержание основных оксидов в красно-желтых ферралитных грунтах и их материнской породе очень сходно.

Геохимические характеристики выветривания. Все 50 образцов, анализируемых в данной работе, представляют собой аргиллиты или алевролиты, а также дисперсные грунты, образовавшиеся при их выветривании. После расчета по вышеприведенным формулам значений ICV (см. табл. 1) 4 образца с $\text{ICV} < 1$ были исключены из дальнейшего расчета параметров химического выветривания. Значения ICV материнских пород варьировали от 1.00 до 1.28 при среднем значении 1.11 (стандартное отклонение 0.10), а для выветрелых грунтов — от 1.00 до 1.32 при среднем значении 1.13 (стандартное отклонение 0.09). Подобное обстоятельство свидетельствует о том, что все изученные образцы являются продуктами первого этапа осадконакопления. Значения CIA_{corr} для материнских пород варьировали от 63.04 до 76.64 при среднем значении 68.63 (стандартное отклонение 3.86); для грунтов значения CIA_{corr} варьировали от 61.17 до 74.87 при среднем значении 68.61 (стандартное отклонение 3.69). CIA_{corr} материнских пород и выветрелых грунтов из разных горизонтов отличаются по интенсивности химического выветривания (см. рис. 4а).

При этом материнские породы и перекрывающие их дисперсные грунты из одних и тех же осадочных горизонтов имеют единую закономерность по степени выветривания:

$$\begin{aligned} \text{K}_1\text{c} (73.26/71.59) &> \text{J}_3\text{s} (68.63/70.17) > \\ &> \text{J}_2\text{s} (67.41/67.82) > \text{J}_3\text{p} (66.16/66.04). \end{aligned}$$

Таким образом, все образцы из разных горизонтов достигли умеренной степени выветривания ($\text{CIA} > 60$). Причем образцы из раннемелового горизонта K_1c имели самый высокий уровень выветривания, тогда как значения CIA_{corr} в остальных образцах из отложений средней и поздней юры существенно не варьировали.

Треугольная диаграмма А–СN–К — это еще один способ выражения индекса химического

изменения CIA_{corr} , который наглядно отражает интенсивность и тенденцию химического выветривания. На рис. 4б видно, что все образцы породы и вышележащих грунтов параллельны линии смектит-иллит и приближаются к стороне А–К, но удалены от базовой линии плагиоклаз–К-полевой шпат, причем более половины образцов пересекли линию смектит-иллит. Это указывает на то, что в процессе химического выветривания их силикатные минералы подверглись явному выветриванию: потери Са и Na в плагиоклазе более значительны, а потери К в калиевом полевошпате очевидны. Все они достигли уровня умеренного химического выветривания (60–80). Что касается образцов из разных горизонтов, то все образцы из горизонта K_1c пересекли линию смектит-иллит и вступили в стадию выветривания калия, которая постепенно параллельна линии А–К: образцы из горизонтов J_3s и J_2s находятся по обе стороны линии смектит-иллит, а большинство образцов из горизонта J_3p — ниже линии смектит-иллит.

Подобное обстоятельство свидетельствует о том, что общая степень выветривания образцов из отложений K_1c самая высокая, с очевидным выветриванием калиевого полевого шпата. За ними следуют отложения J_3s и J_2s , которые выветрились в равной степени. В горизонте J_3p , который выветрился меньше остальных, выветривание калиевого полевого шпата отражается менее явно. В совокупности минеральный состав исходных пород и продуктов их выветривания колеблется в одном и том же диапазоне, а интенсивность и тенденция выветривания согласуются между различными горизонтами для образцов материнских пород и красно-желтых ферралитных грунтов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Между составом красно-желтых ферралитных грунтов и их материнскими породами прослеживается значительная преемственность. Все исследованные образцы красно-желтых ферралитных грунтов были отобраны с территорий сельскохозяйственных угодий или лесных массивов в холмистых и горных районах Сычуаньской впадины. На основании анализа полученных результатов видно, что дисперсные грунты образовались в результате выветривания пород четырех различных геологических возрастов. При этом наблюдается значительное их сходство с образцами материнских пород, что свидетельствует о преемственности между физическими свойствами и химическим составом выветрелых грунтов и их материнских пород. Это нашло отражение в следующих аспектах.

1. Профиль выветрелых грунтов однороден, явной стратификации на отдельные горизонты не наблюдается. Цвет их четко прослеживается

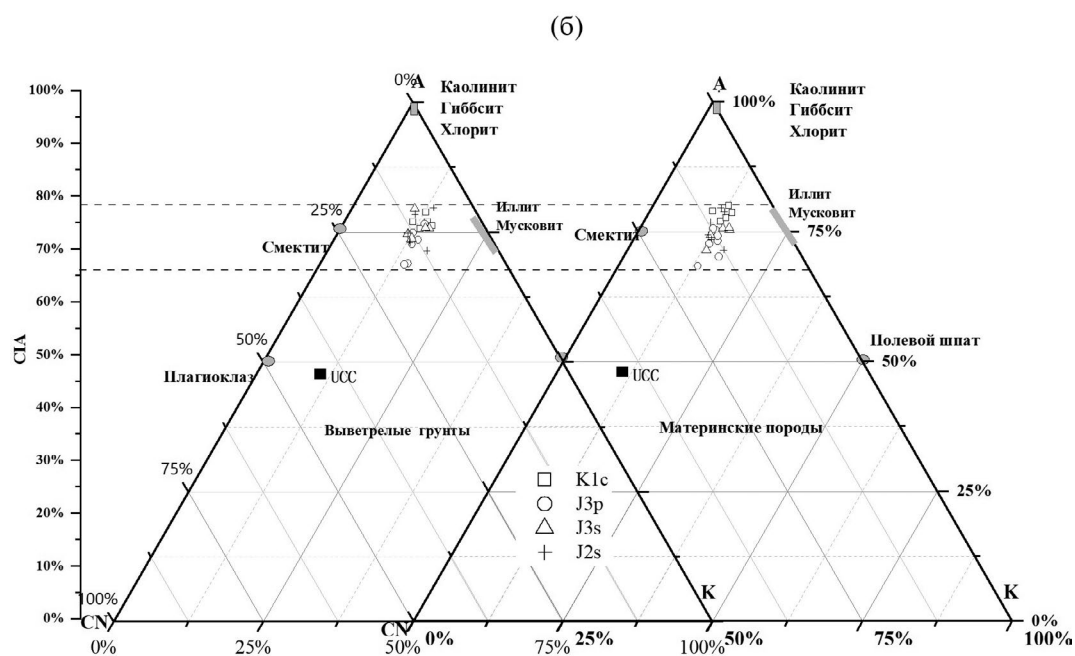
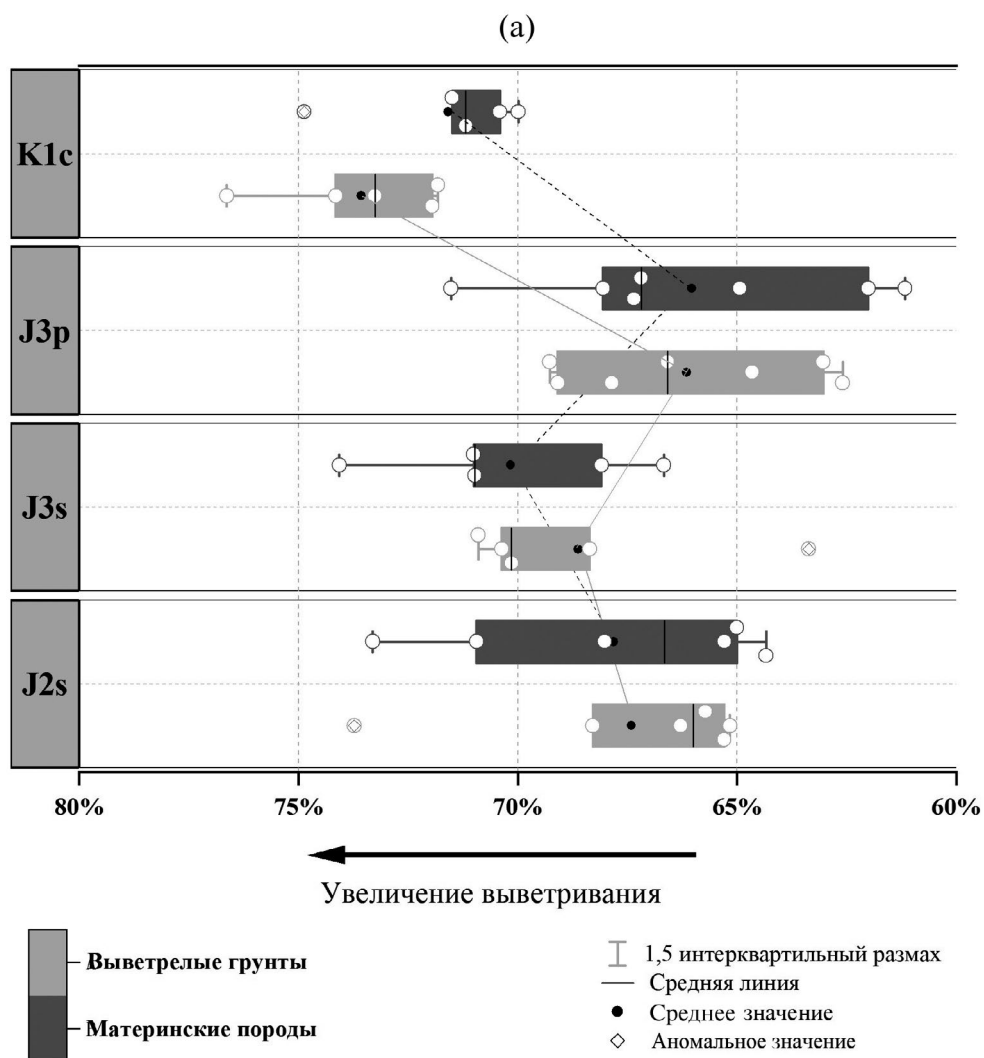


Рис. 4. Изменение индекса $CIA_{\text{сорт}}$ (а) и тренды выветривания А–CN–К для материнских пород и красно-желтых ферралитных (выветрелых) грунтов (б).

по всему профилю и соответствует цвету материнских пород (коре выветривания). Мощность выветрелого слоя, как правило, не превышает 100 см, в основном 30–50 см. Основной причиной этого является то, что данные отложения распространены на крутых склонах, а в районе исследований в летний период наблюдаются высокие температуры и обильные осадки, чем обусловлены интенсивный поверхностный сток и сильная эрозия, что приводит к образованию слабого и недифференцированного профиля выветривания материнских пород;

2. Плотность твердого компонента, содержание органического углерода, гранулометрический, минеральный и химический состав материнских пород и выветрелых грунтов также значительно сходны. Генезис красно-желтых ферралитных грунтов – это, по сути, процесс изменения горных пород под влиянием экзогенных факторов, протекающий в приповерхностной части литосферы [3, 30]. Как правило, выветривание обусловлено сочетанием градиентов химического и физического потенциалов [17, 39]. При физическом выветривании изменение пород происходит под действием механических воздействий, приводящих к их дезинтеграции и фрагментации, а при химическом выветривании процессы растворения, гидратации, гидролиза, окисления и карбонизации приводят к формированию минерального и химического состава выветрелых грунтов, отличающих ее от материнских пород. В данном исследовании образцы дисперсных грунтов были взяты непосредственно из коры выветривания материнских пород. Их морфология и текстура заметно отличаются от материнской породы (см. рис. 1). В то же время физические свойства и химический состав грунтов сохраняют высокую степень сходства с породой. Это указывает на то, что в процессе выветривания исследованных грунтов роль физических агентов выветривания гораздо выше, чем химических.

Высокая интенсивность выветривания и устойчивость материнских пород к химическому выветриванию приводят к слабой выраженности этого вида преобразования. Так, индекс химического выветривания, выраженный через $СИА_{\text{сорт}}$, показывает, что образцы пород из раннемелового K_1c , позднеюрского J_3s , J_3p и среднего J_2s отделов в пределах территории Сычуаньского бассейна в целом достигли стадии умеренного выветривания ($СИА_{\text{сорт}} > 60$). Согласно предыдущим исследованиям, материнские породы раннемелового периода K_1c , позднеюрского J_3s , J_3p и среднеюрского J_2s периодов в Сычуаньской впадине представлены озерно-аллювиальными осадочными породами [27], а климат бассейна в период от средней до поздней юры был неустойчивым и характеризовался чередованием умеренного и аридно-влажного типов. В период раннего

мела территория Сычуаньской впадины в целом характеризовалась умеренным палеоклиматом, который чередовался с полузасушливым и постепенно смещался к засушливо-жаркому [19]. Такие палеоклиматические условия предопределили более высокую интенсивность выветривания осадочных пород территории впадины. Все образцы красно-желтых ферралитных грунтов имеют одинаковую интенсивность выветривания и тренд выветривания в соответствующих материнских породах, что свидетельствует о слабо выраженной стадии химического выветривания в процессе преобразования пород. Причина слабого химического выветривания связана в основном с тем, что в материнских породах мелового и юрского периодов с течением геологического времени (от нескольких миллионов лет до более 100 млн лет) постепенно кристаллизовались аморфные оксиды железа, связанные с минеральными частицами пород [15]. При этом поверхность минеральных зерен в породе инкапсулировалась железом и марганцем, благодаря чему их химические свойства остаются стабильными даже при сильном воздействии диagenетических факторов.

Процесс формирования красно-желтых ферралитных грунтов характеризуется быстрыми процессами физического выветривания материнских пород. Материнские породы состоят из переслаивающихся песчаников и аргиллитов, которые в силу своей однородной текстуры и минералогических характеристик очень восприимчивы к процессам их физического выветривания. При изменении температуры и режима увлажнения-высушивания породы подвергаются неравномерному расширению и сжатию, в них образуются крупные трещины и обломки пород, дезинтеграция которых, в свою очередь, приводит к образованию песчаных и более мелких частиц. Из-за субтропического муссонного влажного климата Сычуаньской впадины обнаженные материнские породы быстро разрушаются и переходят в дисперсный красно-желтый ферралитный грунт. Хотя скорость выветривания варьирует в зависимости от возраста материнских пород, в целом красноцветные породы имеют к этому гораздо более высокую склонность, чем другие типы осадочных пород, распространенные на изучаемой территории. Особенно это касается отложений J_2s : для преобразования материнских пород до состояния выветрелого грунта с преобладанием частиц песчано-глинистой фракции в естественных условиях требуется всего около 5 лет, а при высокоплотном возделывании в процессе сельскохозяйственного производства – всего около 3 лет [36]. Быстрый процесс физического выветривания материнских пород также объясняет, почему физические свойства и минеральный состав красно-желтых ферралитных грунтов сильно зависят от химико-минерального состава материнских пород.

Особенности элементного состава красно-желтых ферралитных грунтов. В процессе почвообразования желто-красных субтропических лесных почв одновременно происходят процессы физического и химического выветривания [9]. Формирование красно-желтых ферралитных грунтов характеризуется вымыванием основных обменных ионов при химическом выщелачивании, но в то же время, благодаря быстрому физическому выветриванию материнской породы, вымываемые при выщелачивании обменные ионы могут быть в определенной степени компенсированы содержанием этих элементов в материнской породе. Поэтому концентрация основных обменных ионов в выветрелом грунте всегда высока. Обилие карбоната кальция в красно-желтых ферралитных грунтах обуславливает слабощелочную реакцию среды, что значительно замедляет процессы декарбонизации и десиликатизации сельскохозяйственных почв на данной территории [15]. Из-за влажных субтропических условий Сычуаньской впадины и того, что большинство пород расположены на склонах, красно-желтые ферралитные грунты подвергаются эрозии, а материнские породы, в свою очередь, обнажаясь на поверхности, снова подвергаются интенсивному воздействию экзогенных факторов. В результате чего красно-желтый ферралитный грунт и его материнские породы находятся в перманентном состоянии интенсивного выветривания и эрозии.

Подводя итог, можно сказать, что основная причина значительной преобладанности состава красно-желтых ферралитных грунтов и их материнских пород по сравнению с другими грунтами заключается в быстром физическом и слабом химическом выветривании, которая обусловлена легко дезинтегрируемыми и фрагментируемыми аргиллитами, петрографическими характеристиками самой материнской породы, а также ее собственными особенностями, выражающимися в устойчивости к химическому выветриванию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Красно-желтые ферралитные грунты в пределах Сычуаньской впадины образуются в процессе выветривания красноцветных пород нижнемелового K_1c (формация Канси), верхнеюрского J_3p (формация Пэнлайчжэнь), J_3s (формация Суйнинга) и среднеюрского J_2s (формация Шаксимяо) возраста и характеризуются явными наследственными признаками материнской породы. Это проявляется в однородности профиля выветрелой толщи, отсутствии явной стратификации, а также в сходстве продуктов выветривания и материнской породы по плотности твердого компонента, гранулометрическому, минеральному составу и содержанию основных химических элементов.

2. Индекс химического выветривания $CIA_{\text{сорт}}$ показывает, что интенсивность выветривания материнских пород и перекрывающих их грунтов сопоставима и достигла умеренной степени. Треугольная диаграмма $A-CN-K$ соответствует тренду, характерному для процессов химического выветривания, как в отношении материнских пород, так и в отношении красно-желтых ферралитных грунтов. Из чего можно сделать вывод, что материнские породы подвергались интенсивному химическому выветриванию в процессе осадконакопления и с течением времени приобрели устойчивость к воздействию химических агентов выветривания.

3. Высокая степень преобладанности между красно-желтыми ферралитными грунтами и их материнскими породами обусловлена как особенностями выветривания, так и свойствами самих пород. В современных природно-климатических условиях Сычуаньской впадины на первый план при выветривании красноцветных пород выходит довольно быстрая физическая дезинтеграция пород, которая обусловлена в основном однородной текстурой аргиллитовой материнской породы и ее свойством легко растрескиваться в условиях высокой температуры и влажности. Слабая выраженность процессов химического преобразования красноцветных пород при выветривании также обусловлена их природой. За счет чего образующиеся при их выветривании дисперсные красно-желтые ферралитные грунты во многом сходны по своим химико-минеральным характеристикам к исходным породам. Это обстоятельство должно учитываться при опробовании этих пород для оценки уровня антропогенного воздействия в пределах Сычуаньской впадины Китая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Большая советская энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. В 30 т., 3-е изд. М.: Сов. Энциклопедия, 1969. Т. 20. С. 448–449. [The Great Soviet Encyclopedia]. In 30 volumes. A.M. Prokhorov, Ed., 3rd edition. Moscow, Sov. Entsiklopedia Publ., 1969, vol. 20, pp. 448–449 (in Russian)
2. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. <https://docs.cntd.ru/document/1200023481> [ГОСТ 26213–91. Soils. Methods of organic matter determination]. <https://docs.cntd.ru/document/1200023481> (in Russian)
3. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с. Zolotarev, G.S. [Engineering geodynamics]. Moscow, MSU Publ., 1983, 328 p. (in Russian)
4. Amundson R., Jenny H. On a state factor model of ecosystems. *Bioscience*, 1997, no. 47, pp. 536–543.
5. Barshad I. The effect of a variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. In: Proc. Int. Clay Conference, 1996, pp. 167–173.
6. [Chinese soil classification and codes (GB-17396-2009)]. China National Institute of Standardization, 2009. (in Chinese)

7. Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, no. 59, pp. 2919–2940.
8. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Brindley G.W., Brown G., Eds., *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*, 1980, no. 5, chapter 6, 495 p.
9. Du, J., Luo, Y., Zhang, W., Xu, C., Wei, C. Major element geochemistry of purple soils/rocks in the red Sichuan Basin: China implications of their diagenesis and pedogen. *Environmental Earth Sciences*, 2013, no. 69, pp. 1831–1844.
10. FAO/UNESCO. Soil map of the World. Revised legend, with corrections. Rome: FAO, Technical Paper 20. Reprint of World Soil Resources Report 60, 1988.
11. Gao, Y.X., Li, J. [1:4 million China soil map]. Map Press Publ., 2000. (in Chinese)
12. Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., et al. Weathering geochemistry and Sr–Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2013, no. 14, pp. 292–316.
13. Han, G.Z., Huang, L.M., & Tang, X.G. Potassium supply capacity response to K-bearing mineral changes in Chinese purple paddy soil chronosequences. *J. of Soils and Sediments*, 2019, no. 19, pp. 1190–1200.
14. He, Y., Yang Zhuang W., Liu, C. et al. Crop residue removal effects on soil erosion and phosphorus loss in purple soils region, southwestern China. *Agronomy*, 2023, no. 13(4):1137.
15. He, Y.R. [Purple soils in China]. Chinese Science Press, Beijing, 2003, pp. 80–126 (in Chinese)
16. Hu, J., Huang, Z., Li, S. et al. Assessing profile uniformity of soils from weathered clastic sedimentary rocks in southwest China. *Catena*, 2023, no. 224, pp. 70–107.
17. Jenny, H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Dover Publications. 1994, 281 p.
18. Kamp, P.C., Leake, B.E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 1995, no. 76(4), pp. 411–449.
19. Li Jun, Huang Chengmin, Wen Xingyue, Zhang Maochao. [Mesozoic paleoclimate changes in the Sichuan Basin: evidence from deep-time paleosols]. *J. of Sedimentary Sciences*, 2021, no. 39(5), pp. 1157–1170. (in Chinese)
20. Li, Z., Wang, P., Liu, L., et al. High negative surface charge increases the acidification risk of purple soil in China. *Catena*, 2021, no. 196, pp. 19–48.
21. McLennan, S.M. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 1993, no. 101, pp. 295–303.
22. Methods of soil analysis: part 4. Physical methods. Dane, J.H., Topp, G.C., Eds. Soil Science Society of America, Book series, vol. 5, 2002, 866 p.
23. Nesbitt, H.W., Young, G.M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, no. 48(7), pp. 1523–1534.
24. Nesbitt, H.W., Young, G.M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lites. *Nature*, 1982, no. 299, pp. 715–717.
25. Nesbitt, H.W., Young, G.M., McLennan, S.M., Keays, R.R. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *Journal of Geology*, 1996, no. 104, pp. 525–542.
26. Panahi, A., Young, G.M., Rainbird, R.H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Vile Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, no. 64(13), pp. 2199–2220.
27. Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. Geology of Sichuan province. Geological Publ. House. 1991.
28. Sichuan Geological Bureau Oil Census Brigade. 1:200,000 Geological Map of China. China Geological Reference Library. 1960 Sichuan Basin Group H-48-10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18.
29. Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy (11th Edition). Washington, USDA, Natural Resources Conservation Service, 2010, 338 p.
30. Targulian, V.O., Krasilnikov, P.V. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena*, 2007, no. 71, pp. 373–381.
31. Taylor, S.R., McLennan, S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, London, 1985, 277 p.
32. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1224–1999, Determination of soil density in forests. 1999.
33. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1250–1999, Determination of calcium carbonate in forest soil. 1999.
34. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1239–1999, Determination of forest soil pH. 1999.
35. The state forestry administration of the People's Republic of China. Forestry industry standards of the People's Republic of China, LY/T 1225–1999 Determination of the particle composition (mechanical composition) of forest soils. 1999.
36. Wei, C.F., Ni, J.P., Gao, M. et al. Anthropogenic pedogenesis of purple rock fragments in Sichuan basin, China. *Catena*, 2006, no. 68(1), pp. 51–58.
37. Wronkiewicz, D.J., Condie, K.C. Geochemistry and provenance of sediments from the pongola supergroup, South Africa: Evidence for 3.0 Ga Old Continental Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, no. 53, pp. 1537–1549.
38. Yizhou Peng, Grigorieva, I.Yu. Purple soil inheritance and source of parent rock material and tectonic background in the Sichuan Basin, China. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2023. <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2265125>.
39. Yu, F., Hunt, A.G. Predicting soil formation on the basis of transport-limited chemical weathering. *Geomorphology*, no. 301, pp. 21–27.
40. Zhong, S., Han, Z., Du, J. et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin. China, Scientific Reports, 2019.

THE REASONS FOR THE INHERITANCE OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF RED-COLORED SOILS OF THE MODERN WEATHERING CRUST WITHIN THE WESTERN PART OF THE SICHUAN BASIN OF CHINA

Yizhou Peng^{a,#}, I. Yu. Grigorieva^{a,##}

^a*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

[#]*E-mail: 354151007pyz@gmail.com,*

^{##}*E-mail: ikagrig@inbox.ru*

In this work, we conducted an experimental evaluation and analysis of the characteristics and makeup of red-colored rocks from four representative Cretaceous and Jurassic sedimentary sequences in the western Sichuan Basin of China, as well as their weathering products. To determine the direction of weathering processes and the cause-and-effect link between the characteristics and composition of the parent rocks and the excess chemical components in the weathered soils, the chemical index of alteration was calculated. The findings demonstrated that, with regard to features like color, density of solid component, organic carbon content, granulometric composition, pH, mineral composition, and content of main chemical elements, all samples of weathered (dispersed) soils are quite comparable to the parent rocks. All samples of weathered soils and parent rocks exhibit similar chemical weathering characteristics and an index, according to the results of the CIA_{corr} calculation and the examination of the A–CN–K triangle diagrams. Furthermore, all of them have attained a moderate level of chemical weathering, with samples from Jurassic rocks (J_{3p}, J_{3s}, and J_{2s}) having far lower weathering intensities than those from Cretaceous rocks (K_{1c}). The red-colored rocks are characterized by weak chemical weathering and rapid development of physical weathering. This weathering characteristic can be attributed to the parent rock's uniform texture and mostly clayey composition, which break down readily in environments with high humidity and plenty of heat. The low level of chemical weathering is due to the fact that the parent rock itself has undergone a significant change in chemical composition during sedimentation and subsequent diagenesis, and has acquired a high degree of resistance to subsequent transformation under modern conditions. Therefore, the characteristics and makeup of purple soil are mostly determined by the parent rock.

Keywords: *Sichuan depression, parent rocks, purple soil, the Chemical Index of Alteration (CIA)*