

УДК 574.24:582.973:581.19:543.544.5.68.7

И.Г. Боярских

I.G. Boyarskikh

ИЗМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО МЕТАБОЛИЗМА РАСТЕНИЙ В ЗОНАХ АКТИВНЫХ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО АЛТАЯ

CHANGE OF PLANTS SECONDARY METABOLISM IN AREAS OF ACTIVE SEISMOTECTONIC MANIFESTATIONS OF THE ALTAI MOUNTAINS

Показано, что эндогенные геофизические и геохимические аномалии в локальных зонах активных сейсмотектонических проявлений могут оказывать выраженное влияние на накопление отдельных групп и индивидуальных компонентов флавоноидов и гидроксикоричных кислот в плодах и листьях жимолости синей. Достоверные корреляции установлены между содержанием отдельных классов полифенолов и макро-и микроэлементов Ca, K, Cu, Zn, Fe, Ni, Na и Rb, а также соотношениями ключевых в физиологии растений химических элементов Ca/K, K/Na, Ca/Na, Ca/Fe и Mg/Fe в листьях и плодах *Lonicera caerulea*.

В зонах протекания активных тектонических процессов формируются аномальные геофизические и геохимические поля разной степени неоднородности, способные воздействовать на природную среду. Повышенной (даже по отношению к разломной зоне) трещиноватостью и проницаемостью горных пород характеризуются структурные узлы – участки сочленения разнонаправленных разломных зон различного иерархического уровня, которые создают специфические неоднородные условия обитания растительных популяций, определяя тем самым их структуру. Целью данной работы было изучение изменений вторичного метаболизма растений в зонах активных сейсмотектонических проявлений Горного Алтая (на примере модельного вида *Lonicera caerulea* L. s. l. – жимолости синей). С этой целью проведены комплексные исследования в нескольких зонах разломов северо-западной и юго-восточной частей Горного Алтая.

Объектами исследования служили популяции *L. caerulea*, находящиеся в зонах: Кубадринского глубинного разлома (долина р. Курайка); системы разломов на границе Северо-Чуйского хребта и Курайской межгорной впадины (долины р. Актру); узлах сочленения Джазаторского разлома, (устьевые участки притоков р. Джазатор – рек Ильдыгем, Узургу, Тюнь, а также участки слияния рек Ак-Алахи и Аргута); зоне магнитной аномалии у подножия Катунского хребта, образованной серией активных разломов, пересекающих отрог хребта и разделяющих различные по геомагнитным свойствам породы.

Для картирования зоны геологической неоднородности нами использовались показатели напряженности геомагнитного поля (ГМП), согласно широко распространенному в практике геологической разведки методу (Магниторазведка ..., 1980). Разломные зоны и зоны повышенной трещиноватости в узлах сочленения разломов четко выделяются высокоградиентными понижениями или повышениями значений ГМП. Наиболее высокоградиентные перепады ГМП были зафиксированы в пределах участка у подножья Катунского хребта. Градиент ГМП здесь принимал значения от 53,5 до 72,6 мкТл при фоновых значениях около 60 мкТл (Боярских и др., 2012а). Эманационное поле радона также отчетливо отражает расположение разломных зон, проводящих радон из глубинных слоев литосферы. В зонах разломов концентрация радона повышалась до 400–3200 Бк/м³ при ее фоновом значении около 20 Бк/м³. Увеличение содержания ртути, может указывать на периодическую активизацию конкретных участков разломных зон. В зависимости от района исследований концентрация ртути изменялась в почве от 30 нг/г до до 910 нг/г, в почвенном и приземном воздухе от 2 до 40 нг/м³. В зоне повышенной трещиноватости Кубадринского разлома отмечалось превышение глобального фонового уровня ртути в атмосферном воздухе (1,6 нг/м³) более чем в 20 раз (Боярских и др., 2012б).

Содержание биологически активных фенольных соединений (БАС) в листьях и плодах жимолости синей определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Идентификация отдельных компонентов анализируемых экстрактов и оценка их относительного содержания проводилась с помощью ВЭЖХ-МС анализа. Основные компоненты плодов жимолости синей – это антоцианы (цианидин-3-глюкозид), флавонолы (гликозиды кверцетина), флавоны (гликозиды лютеолина) и производные ги-

Таблица

Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в листьях и плодах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* из популяций Горного Алтая (мг/100 г воздушно-сухой массы)

Компонент	Листья		Плоды	
	среднее	лимиты	среднее	лимиты
Цианидина глюкозид (RT = 14,8)	0	0	1360	291–3067
Неохлорогеновая к-та (RT = 8,7)	0	0	30	0–84
Хлорогеновая к-та (RT = 13,3)	932	78–2518	217	36–544
Изомер хлорогеновой к-ты (RT = 13,9)	131	20–345	0	0
Гликозид кверцетина с М.м.=742,19 (RT = 16,1)	29	0–85	0	0
Гликозид кверцетина с М.м.=756,20 (RT = 16,7)	57	0–144	0	0
Гликозид лютеолина с М.м. = 596,14 (RT = 17,7)	195	14–348	27	0–74
Гликозид кверцетина с М.м. = 610,15 (RT = 17,9)	147	11–322	8	0–29
Рутинозид кверцетина с М.м. = 610,15 (Рутин) (RT = 18,6)	99	0–260	36	0–97
Гликозид лютеолина с М.м. = 580,14 (RT = 18,8)	392	66–764	8	0–44
Гликозид лютеолина с М.м. = 594,16 (RT = 19,1)	50	0–212	2	0–13
Гликозид кверцетина с М.м. = 464,10 (RT = 19,5)	261	39–857	42	9–100
Гликозид лютеолина с М.м. = 594,16 (RT = 19,7)	91	19–232	0	0
Гликозид лютеолина с М.м. = 448,10 (RT = 20,0)	1762	221–3324	25	0–122
Рутинозид лютеолина с М.м. = 624,17 (RT = 20,2)	58	26–120	1	0–17
Неизв. флавоноид с М.м. = 564,15 (RT = 20,5)	113	54–196	0	0
Гликозид лютеолина с М.м. = 594,16 (RT = 21, 2)	117	40–258	0	0
Дикофеилхинная к-та с М.м. = 516,11 (RT = 21,5)	1367	175–2890	7	0–26
Гликозид апигенина с М.м. = 432,10 (RT = 22,1)	170	61–275	0	0
Дикофеилхинная к-та с М.м. = 516,11 (RT = 22,4)	212	20–575	7	0–40
Гликозид лютеолина с М.м. = 462,11 (RT = 23,0)	217	0–509	0	0
Апигенин с М.м. = 270,05 (RT = 27,3)	0	0	1	0–23
Лютеолин с М.м. = 286,05 (RT = 27,6)	15	0–65	0	0
Сумма антоцианов	0	0	1443	353–3309
Сумма производных ГКК	2642	293–5520	261	43–571
Сумма флаванолов	592	82–1489	85	22–186
Сумма флавонов	2998	561–5447	93	16–191
Сумма полифенолов	6848	1153–12295	1824	499–3836

дросикоричных кислот (ГКК) (хлорогеновая, неохлорогеновая и дикофеилхинная кислоты). В экстрактах листьев *L. caerulea* было выявлено наличие производных ГКК – хлорогеновой и дикофеилхинной кислот, рутина, присутствие в большом количестве производных лютеолина, апигенина и кверцетина. Причем разные подвиды жимолости алтайского происхождения *L. caerulea* subsp. *altaica* (Pall.) Gladkova и *L. caerulea* subsp. *pallasii* Ledeb. отличались по индивидуальному составу и по количественному содержанию отдельных компонентов БАС в листьях (Боярских и др., 2014). В связи с чем для сравнительного анализа изменений уровня накопления полифенолов в дальнейшем использовали только алтайский подвид жимолости синей. Сравнительный анализ хроматограмм экстрактов листьев и плодов *L. caerulea* subsp. *altaica*, собранных в природных популяциях, показал сходный качественный состав по основным индивидуальным компонентам БАС (табл.). Состав минорных компонентов изменялся в зависимости от места произрастания этого подвида *L. caerulea*.

Количественные показатели индивидуально-группового состава биологически активных веществ имели значительные различия в зависимости от места произрастания растений (см. табл.). В пределах одной популяции между растениями, произрастающими в сходных микроклиматических условиях, в экстрактах из плодов и листьев *L. caerulea* subsp. *altaica* наблюдалась значительная разница по содержанию классов фенольных соединений (рис. 1), а также отдельных компонентов. На всех изученных участках отмечалось значительное (в 3–10 раз) увеличение содержания антоцианов и производных ГКК в плодах *L. caerulea*

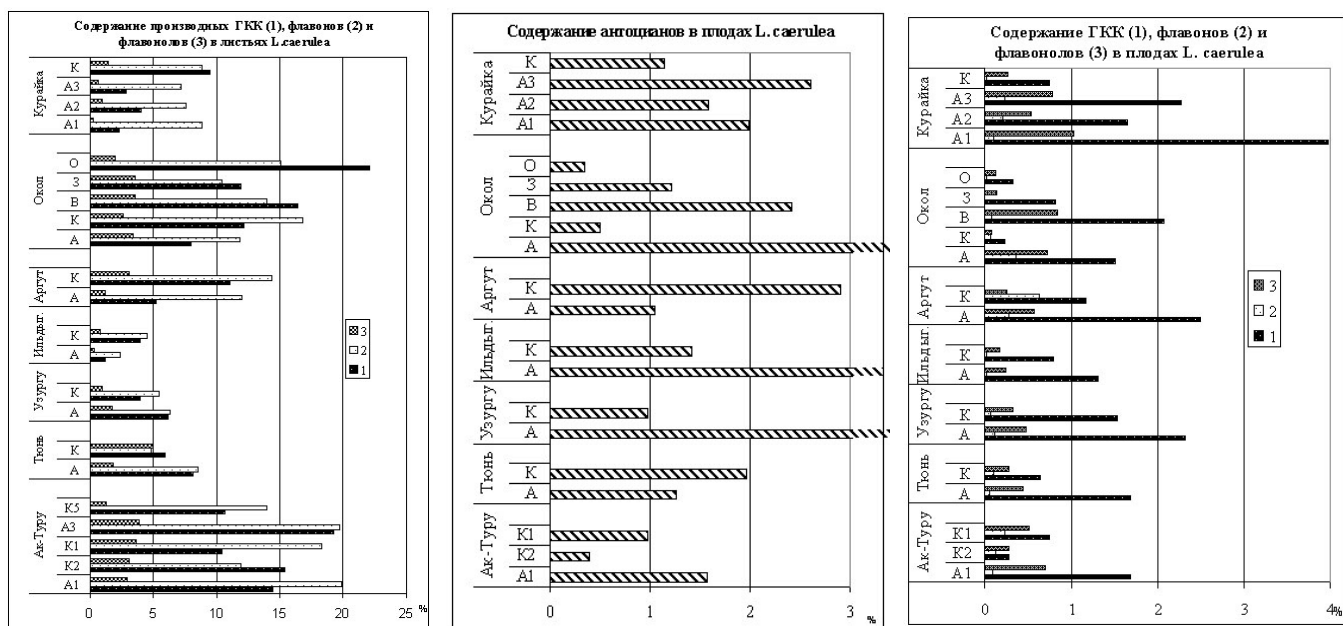


Рис. 1. Сравнительная оценка содержания отдельных классов БАС в плодах и листьях растений *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* из разных по геоэкологическим характеристикам участков. По горизонтали – площадь хроматографических пиков в %, по вертикали – точки отбора проб. А – зоны геоэкологических аномалий; К – контрольные площадки; В, З и О – площадки, различающиеся по комплексу геохимических и геофизических факторов. 1 – сумма ГКК, 2 – сумма флавоноидов, 3 – сумма флаванолов.

subsp. *altaica*, собранных на площадках, находящихся в зонах локальных геохимических и геофизических аномалий (повышенная концентрация ртути и отдельных микроэлементов и радионуклидов, высокоградиентное магнитное поле) (Боярских и др., 2014).

На одном из участков проведения исследований (р. Окол, Катунский хр.) отмечалось значительное увеличение уровня накопления БАС в плодах и одновременное уменьшение содержания их отдельных компонентов в листьях растений из зоны магнитной аномалии (А) и из микропопуляции в зоне активного тектонического разлома (В), что говорит о возможном интенсивном оттоке полифенолов в аттрагирующие органы (плоды) под влиянием стресса. Известно, что БАС в растениях проявляют многофункциональное биологическое действие, изменение их синтеза часто рассматривают как адаптивную реакцию растений на различные условия произрастания (Запрометов, 1996). Флавоноиды и ГКК способны образовывать устойчивые комплексы с ионами тяжелых металлов, обеспечивая секвестирование (арест) их избыточного количества, попадающего в растения из почвы. Считается, что тем самым флавоноидные соединения предотвращают развитие окислительного стресса (Gould et al., 2002). Содержание химических элементов и уровень накопления БАВ в органах растений изменялись в процессе созревания плодов. Достоверные на 95%-ном и более высоких доверительных уровнях линейные связи с отдельными классами БАВ установлены для макроэлементов Са и К и их соотношений, изменение которых является одним из факторов регуляции устойчивости клеток. Из микроэлементов на изменение концентрации БАВ в органах растений достоверно влияли Cu, Zn, Fe, Ni, Na и Rb. Значимое влияние на синтез БАВ оказывали соотношения ключевых в физиологии растений химических элементов Са/К, К/Na, Са/Na, Са/Fe и Mg/Fe.

Комплексные геоэкологические и ботанические исследования показали, что в локальных зонах активных тектонических разломов в популяциях *L. caerulea* наблюдается увеличение уровня накопления в плодах флавоноидов и гидроксикоричных кислот. Достоверные корреляционные зависимости установлены между содержанием отдельных классов полифенолов и макро-и микроэлементов Са, К, Cu, Zn, Fe, Ni, Na и Rb, а также соотношениями ключевых в физиологии растений химических элементов Са/К, К/Na, Са/Na, Са/Fe и Mg/Fe в листьях и плодах *Lonicera caerulea*.

ЛИТЕРАТУРА

Боярских И.Г., Сысо А.И., Худяев С.А. и др. Особенности элементного и биохимического состава *Lonicera caerulea* L. в локальной геологически активной зоне Катунского хребта (Горный Алтай) // Геоф. процессы и биосфера, 2012а. – Т. 11, № 3. – С. 70–84.

Боярских И.Г., Сысо А.И., Агатова А.Р. и др. Элементный состав почв и метаболизм растений в зонах сейсмо-активных разломов (Курайский хребет, Горный Алтай) // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Материалы VII междунар. науч.-практ. конф. (4–8 октября 2012 г., Семей). – Семей, 2012б. – Т 1. – С. 422–429.

Боярских И.Г., Васильев В.Г., Кукушкина Т.А. Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в *Lonicera caerulea* (*Caprifoliaceae*) в популяциях Горного Алтая // Раст. ресурсы, 2014. – Вып. 1. – С. 105–121.

Запаметов М.Н. Фенольные соединения и их роль в жизни растения. – М.: Наука, 1996. – 45 с.
Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. – М.: Недра, 1980. – 367 с.

Gould K.S., Mckelvie J, Markham K.R. Do anthocyanins function as antioxidants in leaves? Imaging of H₂O₂ in red and green leaves after mechanical injury // Plant, Cell and Environment, 2002. – No. 25. – P. 1261–1269.

SUMMARY

It is shown that endogenous geophysical and geochemical anomalies in the local geo-active zones might affect the accumulation of individual groups and individual components of flavonoids and hydroxycinnamic acids in the fruit and leaves of the *Lonicera caerulea*. Reliable correlations were installed between the content of individual classes of polyphenols and macro- and microelements Ca, K, Cu, Zn, Fe, Ni, Na и Rb, as well as ratios of physiologically important for plants chemical elements in the leaves and fruits of *L. caerulea*.