

УДК 574.24:504.5:502.64

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО И БИОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА *LONICERA CAERULEA* L. В ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ЗОНЕ КАТУНСКОГО ХРЕБТА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

© 2012 г. И.Г. Боярских¹, А.И. Сысо², С.А. Худяев², А.И. Бакиянов³,
С.П. Колотухин⁴, В.Г. Васильев⁵, О.В. Чанкина⁶

¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск, Россия

⁴ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», г. Москва, Россия

⁵Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁶Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Представлены результаты комплексных геофизических, почвенно-геохимических и биохимических исследований, выполненных в локальной геологически активной зоне Горного Алтая. В результате магнитометрических измерений выделены участки с высокоградиентным магнитным полем, на которых отмечалось значительное увеличение концентрации отдельных радионуклидов, в том числе космогенного происхождения (^{7}Be). На локальных участках, связанных с геолого-геофизической неоднородностью, выявлена зависимость между минеральным составом подстилающих пород и концентрацией химических элементов в почвах и растениях. Отмечено изменение физиолого-биохимического состава листьев растений в зоне, характеризующейся аномальными значениями магнитного поля, повышенной концентрацией радионуклидов и микро- и макроэлементов в почве. Сделано предположение о возможном влиянии комплекса геофизических и почвенно-геохимических факторов, связанных с геологической активностью на изученном участке, на биохимический метаболизм растений и массовые цитозембриологические нарушения в популяции *Lonicera caerulea* L.

Ключевые слова: геомагнитные аномалии, почвы, растения, *Lonicera caerulea* L., элементный химический состав, радиоизотопы, радиоактивность, фенольные соединения.

PASC 91.25.fд, 91.25.Rt, 91.32.Jk, 91.62.Kt, 91.62.Mn, 91.62.Uv, 91.67.Uv

Введение

В зонах активных геологических процессов возникают геофизические, атмо-, гидро- и педогеохимические аномалии, вызывающие у биоты широкий спектр ответных реакций в виде изменений химического и биохимического состава органов и тканей, увеличения фенотипического и генетического полиморфизма и появления тератных форм [Трифонов, 1999]. Получены данные о наличии воздействия тектонических нарушений на окружающую среду за счет возникновения наведенных магнитотеллурических токов, глубинной дегазации и изменения структуры барического поля. По величине энергетических характеристик тектонических нарушений (в первую очередь геомагнитных вариаций, атмосферного давления, глубинной дегазации) можно выделять участки биологического комфорта–дискомфорта [Кутинов и др., 2009]. В целом влияние разного рода аномалий в геологически активных зонах на биологические системы изучено недостаточно, что обусловлено сложностью проблемы: многофакторностью, слабостью воздействия отдельных внешних факторов на живые организмы, неочевидностью причинно-следственных связей, отсутствием необходимого объема качественных данных.

Сравнительная оценка изменчивости репродуктивной сферы жимолости синей (*Lonicera caerulea* L.) в различных по экологическим характеристикам районах Горного Алтая показала, что наиболее значительное увеличение полиморфизма морфологических признаков цветка, а также нарушение их функционального значения происходило в локальной зоне с комплексом геологических аномалий (участок в Усть-Коксинском районе в окрестности пос. Верхний Уймон). Наряду с большим разнообразием формы цветков здесь отмечались растения с различными типами фасциированных цветков, нехарактерным расположением андроеца и гинецея, аномалиями в строении пыльников. (Как известно, признаки цветка наиболее постоянны. Оценивая уровень их изменчивости в популяции, можно определять наличие стрессовых воздействий на растения, о чем свидетельствует, как правило, массовое появление тератологических изменений и увеличение амплитуды изменчивости [Мамаев, Махнев, 1982].)

При оценке качественных и морфометрических характеристик пыльцы жимолости, было установлено, что на этом же участке встречались растения с фертильной, не выравненной по размерам пылью, а также растения с высоким процентом стерильных пыльцевых зерен, что указывало на нарушение мейоза в процессе микроспорогенеза. Отмечались и последствия цитомиксиса: в гнездах пыльников среди нормально сформированных пыльцевых зерен наблюдалось некоторое количество бесформенных, сжатых в комок отмерших клеток; отдельные пыльцевые зерна содержали, кроме вегетативного и генеративного ядер, микроядра или ядра неправильной формы; в ряде образцов пыльцевые зерна были связаны между собой тяжами плазмодесмы, большинство из них находилось в разной стадии деградации. Пыльцевые зерна в популяциях, расположенных на участках вне зон геологической активности, отличались высокой морфологической полноценностью [Боярских, 2009].

Для выявления факторов, которые могли вызвать массовые аномалии в репродуктивной сфере жимолости, на участке были проведены комплексные геофизические и почвенно-геохимические исследования, а также проанализированы химические и биохимические изменения в органах растений.

Район, объекты и методы исследований

Исследования проводились в Усть-Коксинском районе Республики Алтай в бассейне р. Окол, правого притока р. Катунь, на участке «Молниебойный хребтик», расположенном на северном склоне хр. Каменный белок – части Катунской горной системы. Участок входит в горное обрамление Окольской межгорной впадины и расположен по ее восточному борту. Он представляет собой крыло антиклинальной складки сланцев зеленокаменной формации, интенсивно рассеченной дизъюнктивами. Здесь встречаются дайки основного и кислого составов, а также выходы скарновых пород. Помимо структурно-геологических характеристик, зона сгущенных дизъюнктивных нарушений метаморфических пород на участке устанавливается по повышенному потоку атомарной ртути, вариациям потоков гелия и наличию высокоградиентного магнитного поля [Дмитриев и др., 1989]. Вдоль восточного борта Окольской впадины под четвертичными отложениями фиксируется крупный разлом северо-восточного простирания и взбросо-сдвигового характера, который разделяет отличающиеся по составу фрагменты древней чешуйчатой структуры, выходящие по различным частям обрамления впадин на поверхность [Дмитриев, Буслов, 1989].

Молниебойный хребтик в нижней и средней частях сложен породами эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, представленных частым чередованием кристаллических сланцев, амфиболитов, гранитов, гранито-гнейсов и гнейсов, реже мраморов. На микроучастках отбора проб почв и растений хребтик сложен гранитами на западном склоне (т. А-21, А-22) и сланцами различной степени выветренности на восточном (т. А-23). Коренные породы сверху перекрыты четвертичными осадочными отложениями, на которых сформировались горные черноземовидные лесные почвы. По всему почвенному профилю крупнообломочные скелетные частицы (размером более 1 мм) коренных и осадочных пород присутствуют в значительном количестве (40–60 %). На долю же частиц мелкозема (размером менее 1 мм), играющих ведущую роль в обеспечении растений влагой и химическими элементами, в среднем приходится около 50 % объема почвы.

Микроучастки, на которых проводились исследования, имели сходный геоботанический состав растительности. В качестве модельного объекта выбрана жимолость синяя сем. *Caprifoliaceae* Juss (*Lonicera caerulea* L.). Выбор объекта обусловлен тем, что указанный вид обладает высокой экологической пластичностью, а также продуцирует значительное количество фенольных соединений.

Для определения геофизических условий в районе исследований проводилась магнитная съемка при помощи мобильного магнитометра ММРОС на основе процессорного оверхаузеровского датчика POS-1 (абсолютная точность – 0.1 нТл). Датчик магнитометра располагался на штанге на высоте 2 м над землей. Во время съемки магнитометрист свободно перемещался по маршруту, измерения проводились автоматически с периодичностью 5 с, а координаты замеров фиксировались при помощи GPS Garmin GPSmap 60 (точность – 3–5 м). 16.08.2008 г. и 09.07.2009 г. были проведены измерения по профилю вдоль оси хребтика, а 10.07.2009 г. была сделана площадная съемка прилегающей к ней площади с шагом 50 м между профилями. Анализ результатов измерений делался при помощи геоинформационной системы ArcView. Для точек измерения, находящихся ближе 5 м от точки отбора пробы, рассчитывалось среднее значение с ошибкой среднего. Кроме того, использовались результаты интерполяции поля по имеющимся данным за 2008–2009 гг. методом взвешенных средних с весом, обратно пропорциональным кубу расстояния, и радиусом сглаживания 25 м по сетке с шагом 5 м. Так как при анализе не использовались данные о суточной вариации поля, а распределение поля – высокоградиентное, точность интерполяции можно оценить величиной около 100 нТл.

Параллельно с магнитометрической съемкой с помощью радиометра СРП-68-01 и дозиметра ДБГ-06т велось измерение мощности эквивалентной дозы (МЭД) с одновременной регистрацией координат точки измерения [Радиометрические..., 1970].

Полевая диагностика почв проведена по типовым характеристикам, приведенным в работе [Почвы..., 1973].

Химические элементы для исследования их поведения в системе «почва–растения» изучались методом сопряженного отбора листьев жимолости и анализа почвенного мелкозема зоны минерального питания растений. Содержание физической глины в мелкоземе определялось методом Качинского, а гумуса – методом Тюринга в модификации Никитина; реакция среды водной суспензии измерялась потенциометрическим методом. Валовое содержание элементов в почвах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа в Институте ядерной физики СО РАН (накопитель ВЭПП-3) [Куценкогий, 2005]. Подвижные формы элементов из почв извлекали ацетатно-аммонийным буфером (рН 4.8). Содержание химических элементов в листьях определяли после их предварительного озоления в муфельной печи при 600 °С и последующего разложения золы концентрированными кислотами (HNO₃, HCl) и 30%-ным H₂O₂. В экстрактах из почв и в растворе золы растений концентрация химических элементов измерялась атомно-абсорбционным методом. Интенсивность биологического поглощения элементов листьями оценивали по значениям коэффициентов биогеохимической подвижности (КБП), рассчитываемым как отношение содержания элемента в сухом веществе растений к концентрации подвижной формы элемента в почве [Перельман, Касимов, 1999].

Указанными методами в почвах и растениях изучался широкий перечень зольных макро- и микроэлементов, многие из которых влияют на рост, развитие и биохимический состав растений. Так, К, Mg, Mn – участвуют в углеводном, белковом и фосфорном обмене; Са – входит в состав образовательной ткани, способствует адаптации к стрессовым воздействиям и устранению токсичности избыточных концентраций Al, Mn, Fe, Li, Sr; Fe – участвует в окислительно-восстановительных реакциях, является компонентом ряда ферментов, участвующих в синтезе предшественников хлорофилла; Na – отвечает за водно-солевой обмен; Cu – входит в состав ферментов, участвующих в фотосинтезе, её недостаток вызывает задержку роста и цветения, а избыток – приводит к ингибированию реакций метаболизма; Zn – играет важную роль в поддержании запасов углекислого газа для фотосинтеза, недостаток Zn приводит к резкому торможению роста и формирования побегов; Ni – является составной частью фермента уреазы, ответственной за гидролитическое расщепление мочевины. Его недостаток вызывает нарушение метаболизма азота и накопление токсических концентраций мочевины в растениях [Битам и др., 1993; Физиология..., 1998; Медведев, 2005]; избыток Cd в растениях нарушает ферментативную активность, транспирацию и фиксацию углекислого газа, тормозит фотосинтез, изменяет проницаемость клеточных мембран; повышенное содержание Li приводит к повреждению корней [Кабата-Пендиас, 1989]; избыток Sr провоцирует редукцию проводящей системы [Ковальский, 1974], блокирует входящие K⁺-потоки с наружной стороны плазмалеммы [Ивашикина, Соколов, 2006].

В отобранных пробах почв также определялось содержание природных (ПРН) и искусственных (ИРН) радионуклидов, поскольку они являются геофизическим фактором, воздействующим на живые организмы. Радиометрический анализ проводился на гамма-спектрометре с Ge-Li-полупроводниковым детектором. В образцах определяли удельную активность природных радионуклидов (Ra-226, Th-232 и K-40), удельную эффективную активность (A_{эфф}), удельную активность техногенных радионуклидов (Cs-137),

содержание радионуклидов космического происхождения (Be-7), содержание U-238 по его дочернему изотопу Ra-234m.

Для определения содержания фенольных соединений, радионуклидов и микроэлементов в растениях отбирали среднюю пробу с 20–30 особей в каждой зоне, отличающейся геохимическими и геофизическими характеристиками. Содержание флавоноидов и оксикоричных кислот в листьях определяли методом ВЭЖХ.

Для получения экстрактов листьев точную навеску измельченного сырья (около 0.5 г) исчерпывающе экстрагировали 70%-ным этанолом на водяной бане при температуре кипения растворителя. Перед анализом проводили пробоподготовку образца методом твердофазной экстракции через патрон. На промытый водой патрон наносили раствор пробы, промывали 70%-ным, затем 96%-ным этанолом. Для работы брали объединенные фракции.

Идентификация отдельных компонентов анализируемых экстрактов и оценка их относительного содержания проводилась с помощью ВЭЖХ-МС анализа. В состав системы для ВЭЖХ-МС анализа входили: жидкостной хроматограф «Agilent 1200» (с диодно-матричным детектором) и гибридный квадруполь-времяпролетный масс-спектрометр «micrOTOF-Q» (фирма «Bruker»); колонка «Zorbax SB-Aq», 2.1×150 мм, 3.5 мкм; элюент – 2 % HCOOH-ACN (линейный градиент содержания ACN – от 5 до 25 % с 0 до 15 мин, от 25 до 90 % – с 20 до 25 мин). Скорость потока – 0.2 мл/мин. UV-Vis-детектирование велось на пяти длинах волн: 255/16, 340/32, 370/80, 460/80 и 650/80 нм. Кроме этого, сохранялся каждый второй из доступных системе UV-Vis-спектров (150 спектров в минуту) в диапазоне 230–700 нм. Рабочие параметры масс-детектирования: метод ионизации – электростатическое распыление при атмосферном давлении (API-ES); сканирование отрицательных ионов – в диапазоне $m/z = 100–1000$; поток газа-осушителя (азот) – 8 л/мин, его температура – 240 °C, давление на распылителе – 2.0 бар.

Сравнительный анализ содержания флавоноидов и оксикоричных кислот в листьях растений из разных зон (в сумме, по группам и по отдельным компонентам) проводили по площадям хроматографических пиков при длине волны 340/32 нм.

Результаты и их обсуждение

Магнитометрические исследования показали, что на территории Молниебойного хребтика наблюдаются очень резкие перепады значений поля при общем повышенном среднем уровне (табл. 1). Вдоль оси Молниебойного хребтика зоны с высокими градиентами (от 600–700 до 10 000 нТл/м) чередуются с относительно спокойными (40–50 нТл/м), средний уровень невозмущенного (нормального) поля – около 59 000 нТл (рис. 1). Образование подобной полосчатой структуры поля на участке обусловлено, по всей видимости, чередованием зон роговиков с высоким содержанием магнетита (на контактах с гранитами) и практически немагнитных сланцев.

Таблица 1. Характеристика магнитного поля на исследуемых участках Молниебойного хребтика

Участок (точка)	Значение магнитного поля, нТл	
	Среднее	Интерполированное
Аномальная зона-2 (А-21)	61 043±2057	61 913
Западный склон (А-22)	58 893±8	58 889
Восточный склон (А-23)	58 930±14	58 926

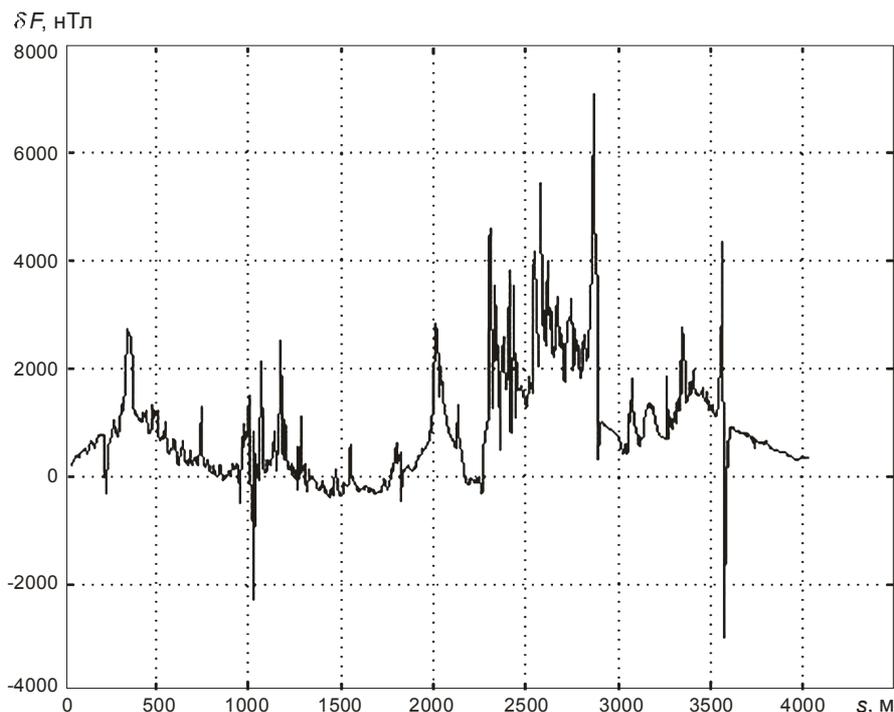


Рис. 1. Магнитный профиль вдоль оси Молниебойного хребтика

При построении профиля магнитного поля на Молниебойном хребтике по результатам маршрутных измерений 16.08.2008 г. и 09.07.2009 г. (см. рис. 1) на нем выявился блок с повышенным полем на расстоянии 2290–2890 м от начала маршрута, связанный, видимо, с зоной ороговикования. Площадная магнитная съемка (доразведка участка с высокоамплитудным полем) позволила обнаружить магнитный диполь (рис. 2). (О подобных магнитных диполях в местах геологической неоднородности упоминается в работе Ю.Г. Кутинова с соавт. [Кутинов и др., 2009].) Точки отбора проб почв и растений находились примерно на расстоянии 2230 м от начала маршрута в области спокойного поля (т. А-22, А-23) и на расстоянии 2300 м от начала маршрута в начале блока с повышенным магнитным полем (т. А-21). На микроучастке «Аномальная зона-2» (зона магнитного диполя) максимальное и минимальное абсолютные значения поля (на высоте 2 м) составляли 73 664 и 53 048 нТл соответственно.

Результаты радиометрических исследований показали изменение величины МЭД естественной радиоактивности на хребтике от 0.1 до 0.21 мкЗв/ч. Причем участки с уровнем 0.1–0.12 мкЗв/ч чередовались с участками, где этот показатель варьировал от 0.16 до 0.21 мкЗв/ч, что также может быть связано с характеристиками подстилающих пород. На микроучастках А-21, А-22 и А-23 уровень МЭД в среднем составил соответственно – 0.168, 0.166 и 0.149 мкЗв/ч.

Определение активности природных и искусственных радионуклидов в зоне минерального питания растений (на глубине 30 см) на Молниебойном хребтике выявило различия между точками отбора проб (табл. 2).

Так, удельная активность Ra-226 и Th-232 колеблется незначительно и составляет 20.4–36.6 и 21.8–38.9 Бк/кг соответственно, активность K-40 изменяется в большем диапазоне – от 281 до 993 Бк/кг. Наибольшие значения удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) имели почвы западного склона (т. А-22), где активность радионуклидов увеличивалась вниз по профилю почв, указывая на нахождение их источника в горных породах. В целом же величина $A_{эфф}$ почв хребтика определялась активностью K-40.

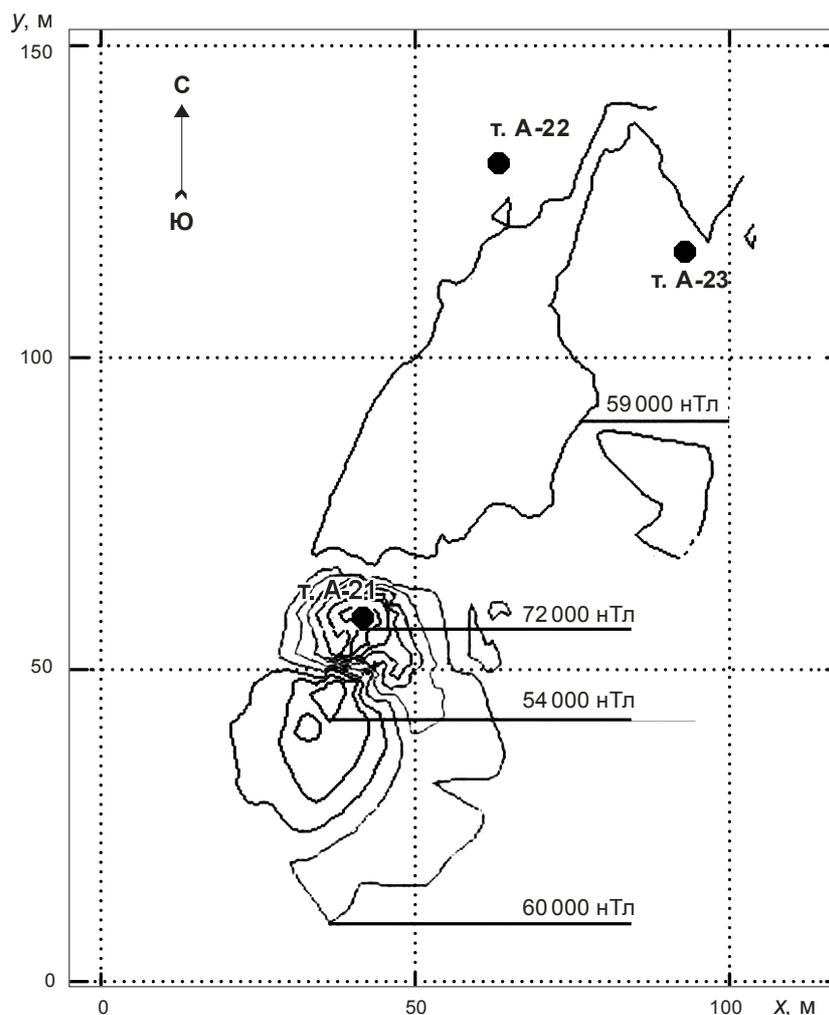


Рис. 2. Напряженность магнитного поля на Молниебойном хребтике в районе отбора проб. Съемка 09.07.2009 г. Изолинии проведены через 1000 нТл

Таблица 2. Активность радионуклидов в зоне минерального питания растений исследуемых участков Молниебойного хребтика

Точка	Участок	Глубина отбора проб, см	$A \pm \Delta_{0,95}$, Бк/кг						
			Ra-226	Th-232	K-40	$A_{эфф}$	Cs-137	Be-7	Pa-234
A-21	Аномальная зона-2	30	28.9±3.4	21.8±2.7	436±155	136±14.8	6± 3.2	665	450±294
A-22(10)	Западный склон	10	31.1±3.4	35±4.5	606±196	132±18.9	7±4	440	344±219
A-22(20)	“	20	21.9±2.4	33±4.1	832±190	140±18.1	2±2	—	718±700
A-22(30)	“	30	36.6±3.8	38.7±4.9	993±201	176±19.5	1±1	315	547±500
A-23	Восточный склон	30	20.4± 2.0	22.2±2.9	397±118	85±11.4	1±1	0	229±175

Примечание. Активность Be-7 рассчитана на момент отбора проб.

Судя по небольшой активности в почве Cs-137 (1–7 Бк/кг) и ее уменьшению с глубиной, она определяется глобальным осаждением изотопа из воздушной среды.

Следует отметить весьма существенные различия между точками по величине активности в почвах Be-7. Особенно велико ее значение в т. А-21 – 665 Бк/кг на момент

отбора пробы. В этой же аномальной зоне зарегистрирована наибольшая активность К-40 и Cs-137. Возможно, это каким-то образом связано с наличием здесь аномально высокого магнитного поля и с более активным осаждением аэрозольных частиц, несущих Cs-137 и Be-7.

Описанные различия между точками по активности в почвах радионуклидов предполагают разное их накопление в растениях и определяют степень воздействия радиации на них.

Изучение мелкозема показало, что почвы микроучастков характеризуются средне-суглинистым гранулометрическим составом, близкой к нейтральной реакции среды и довольно высоким содержанием органического вещества (табл. 3). Разнообразие горных пород на участке обусловило неоднородность химического состава исследуемых почв, что проявляется в варьировании как валового содержания, так и концентрации подвижной формы химических элементов. По сравнению с другими почвами Алтая, горные почвы Молниебойного хребтика имеют относительно высокое валовое содержание Ca, K, Mn, Fe, Sr. В почвах т. А-23, сформировавшихся на сланцах, обнаружено максимальное количество химических элементов (кроме Fe и Cu) (табл. 4). С генезисом почв и минеральным составом сланцев мы связываем и высокое валовое содержание в почвах т. А-23 калия, но относительно низкую активность его изотопа К-40 и других радионуклидов, количество которых в почвах т. А-21 и А-22, сформировавшихся на гранитах, заметно больше. Известно, что в гранитах калий в основном сосредоточен в калиевых полевых шпатах и слюдах, поэтому от количества и соотношения этих минералов в породах и почвах зависит как общее содержание калия, так и активность его изотопа К-40.

Определение подвижной формы элементов в почвах показало, что в т. А-23 (на сланцах) относительно высока концентрация Ni и Zn, а в почвах т. А-21 и А-22 (на гранитах) – Ca, Mg, Na, K, Fe, Sr, Cu, Cd и Li (табл. 5). Эти различия мы связываем с разным валовым содержанием и неодинаковой подвижностью элементов, обусловленной спецификой минерального состава почвообразующих пород и взаимовлиянием ионов элементов, в частности доминированием подвижных форм кальция и магния.

Таблица 3. Общая характеристика почв исследуемых участков Молниебойного хребтика

Точка	Тип почвы	Экспозиция склона	Высота над уровнем моря, м	pH _{водн.}	Физическая глина*, %	Органическое вещество*, %
А-21	Горная лесная черноземовидная	Запад	1309	6.8	35	18.19
А-22	“	Запад	1269	6.4	35	10.36
А-23	“	Восток	1268	6.7	31	9.44

*Содержание указано для почвенного мелкозема.

Таблица 4. Валовое содержание химических элементов в почвах исследуемых участков Молниебойного хребтика, мг/кг

Точка	К	Ca	Mn	Fe	Sr	Ni	Cu	Zn	Cd
А-21	14444	43793	2638	79636	228	20	71	121	0.12
А-22	20472	23458	2323	60275	216	29	39	109	0.16
А-23	22832	44362	2769	70856	304	46	33	184	0.18

Таблица 5. Содержание химических элементов (мг/кг) в почвах (C_1), листьях жимолости (C_2) и коэффициенты биогеохимической подвижности (КБП) в пределах исследуемых участков Молниебойного хребтика

Химический элемент	т. А-21			т. А-22			т. А-23		
	C_1	C_2	КБП	C_1	C_2	КБП	C_1	C_2	КБП
K	429	16 950	21	370	16 528	27	680	16 528	24
Ca	9900	16 746	1.7	6270	14 850	2.4	6105	15 875	2.6
Mn	28	56	2	43	49	1.1	43	70	1.6
Fe	27	12	0.45	35	12	0.34	21	11	0.54
Mg	1150	3808	3.3	638	3712	5.8	704	3919	5.6
Na	100	32	0.32	44	19	0.44	39	23	0.58
Sr	55	33	0.59	43	31	0.73	53	41	0.77
Ni	0.05	0.69	14	0.05	0.59	12	0.2	0.59	3
Cu	0.12	6	50	0.04	5.8	161	0.09	5.6	62
Zn	1.8	29	16	1	23	23	2.8	26	9
Cd	0.038	0.05	1.2	0.023	0.03	1.3	0.026	0.02	1.6
Li	0.33	0.96	2.9	0.24	1.02	4.3	0.27	1.41	5.2

По агрохимическим критериям оценки содержание в почвах подвижных форм K, Ca и Mg – очень высокое, Mn – высокое, Zn – среднее (т. А-23) и низкое (т. А-21 и А-22), Cu – низкое. Эти данные свидетельствуют о существенном дисбалансе макро- и микро-элементов в почвах.

Поскольку даже незначительное отклонение от нормы содержания и соотношения химических элементов в почве может вызывать у растений ответную адаптивную реакцию, одной из задач исследования стало выявление «отклика» химического состава растений на изменение содержания макро- и микроэлементов в почвах.

Установлено, что количество и соотношение химических элементов в почве влияет на интенсивность их поглощения растениями. Так, имеющийся антагонизм ионов кальция и магния по отношению к ионам натрия, стронция, железа сказался на поглощении последних и обусловил низкие значения коэффициентов их биогеохимической подвижности (КБП) в жимолости, произрастающей в пределах исследуемого региона (см. табл. 5). Помимо подвижности, общего содержания и соотношения элементов в почвах, большую роль в накоплении их растениями играет биологическая значимость для них того или иного элемента, а также потребность в нем в конкретных условиях среды [Добровольский, 2009].

Расчеты КБП показали, что поступление химических элементов в листья жимолости, как правило, обратно пропорционально их концентрации в почве (см. табл. 5). Это говорит о том, что интенсивность поглощения элементов в большей степени определяется потребностью растения в элементе, а не его концентрацией в почве. Для микроэлементов, содержащихся в почве в малом количестве (Ni, Cu, Zn), характерны самые высокие значения КБП. Из макроэлементов наиболее интенсивно поглощается K.

К сожалению, мы не нашли опубликованных сведений, позволяющих оценить содержание изученных элементов в листьях жимолости с точки зрения их недостатка или избытка. Сопоставление полученных нами данных с результатами анализа листьев жимолости, произрастающей на Тянь-Шане [Самусенко и др., 2005], говорит о том, что содержание K, Ca и Mg в листьях жимолости на Алтае близко к их количеству на Тянь-Шане, а вот концентрация Fe и Na на Алтае заметно меньше. Судя по критериям растительной диагностики обеспеченности кустарниковых растений макро- и микроэlemen-

тами [Церлинг, 1990], содержание K, Ca, Mg и Mn в изученных нами листьях жимолости близко к оптимальному (нормальному) уровню, а содержание Fe, Cu и Zn – несколько меньше нормы.

На накопление макро- и микроэлементов растениями, возможно, влияют также магнитное поле и радиоактивность почв. Однако повышенные значения магнитного и радиационного полей в т. А-21 хотя и сопровождались максимальным накоплением элементов (K, Na, Ca, Zn, Cu, Cd, Ni) в листьях жимолости, но не привели к росту КБП по сравнению с другими точками на хребтике. Напротив, здесь получены самые низкие значения КБП.

В целом же в т. А-21 сложились наиболее напряженные условия для развития растений, проявляющиеся в перестройке метаболизма. Считается, что увеличение концентрации флавоноидных веществ – один из механизмов адаптации растений к неблагоприятным или необычным факторам внешней среды. Флавоноиды являются восстанавливающими агентами и вместе с другими природными соединениями (каротиноидами, аскорбиновой кислотой) защищают клетки от окислительного стресса [Запрометов, 1996]. По мнению Р.А. Ларсона [Larson, 1988], наиболее перспективные соединения, повышенная концентрация которых может служить мерой устойчивости к подобным нагрузкам, – это хлорогеновая кислота и ее производные.

Сравнительный анализ хроматограмм экстрактов листьев жимолости, отобранных из разных по геофизическим и геохимическим характеристикам точек, показал их сходство по качественному составу фенольных соединений.

На основании данных сравнительного анализа времени удерживания пиков вещества на хроматограммах анализируемых и стандартных образцов, а также компьютерного сравнения спектров поглощения, полученных при хроматографировании пиков, с имеющейся у нас базой данных выявлено наличие в растворах хлорогеновой кислоты, рутина, присутствие в большом количестве производных хлорогеновой кислоты, лютеолина, апигенина и кверцетина. Остальные компоненты (рис. 3) пока не идентифицированы.

Установлено (табл. 6), что в т. А-21 суммарное содержание хлорогеновой кислоты и ее производных возрастает соответственно в 1.6 и в 3.3 раза по сравнению с точками на восточном и западном склонах (т. А-23 и А-22), расположенных вне зоны магнитной аномалии, что свидетельствует о возможном влиянии комплекса присущих этому участку геофизических и почвенно-геохимических факторов на усиление биосинтеза названных веществ. Также здесь отмечается увеличение в листьях жимолости суммарного содержания всех фенольных компонентов, определенных хроматографическим методом.

Наименьшее содержание практически всех компонентов оказалось в микропопуляции на западном склоне (т. А-22), где магнитное поле спокойное, но относительно высоко содержание радионуклидов.

Увеличение концентрации флавононов отмечалось в т. А-21 и А-23; разница по этому показателю между ними незначительна и превосходит его значение в т. А-23 в 1.5 раза.

Содержание флавонолов на всех участках оставалось постоянным и не зависело от изменений условий среды.

Сравнительный анализ содержания индивидуальных фенольных компонентов в листьях жимолости, растущей на разных участках хребтика, выявил противоположные зависимости между процентом их содержания в экстрактах и характеристиками участков.

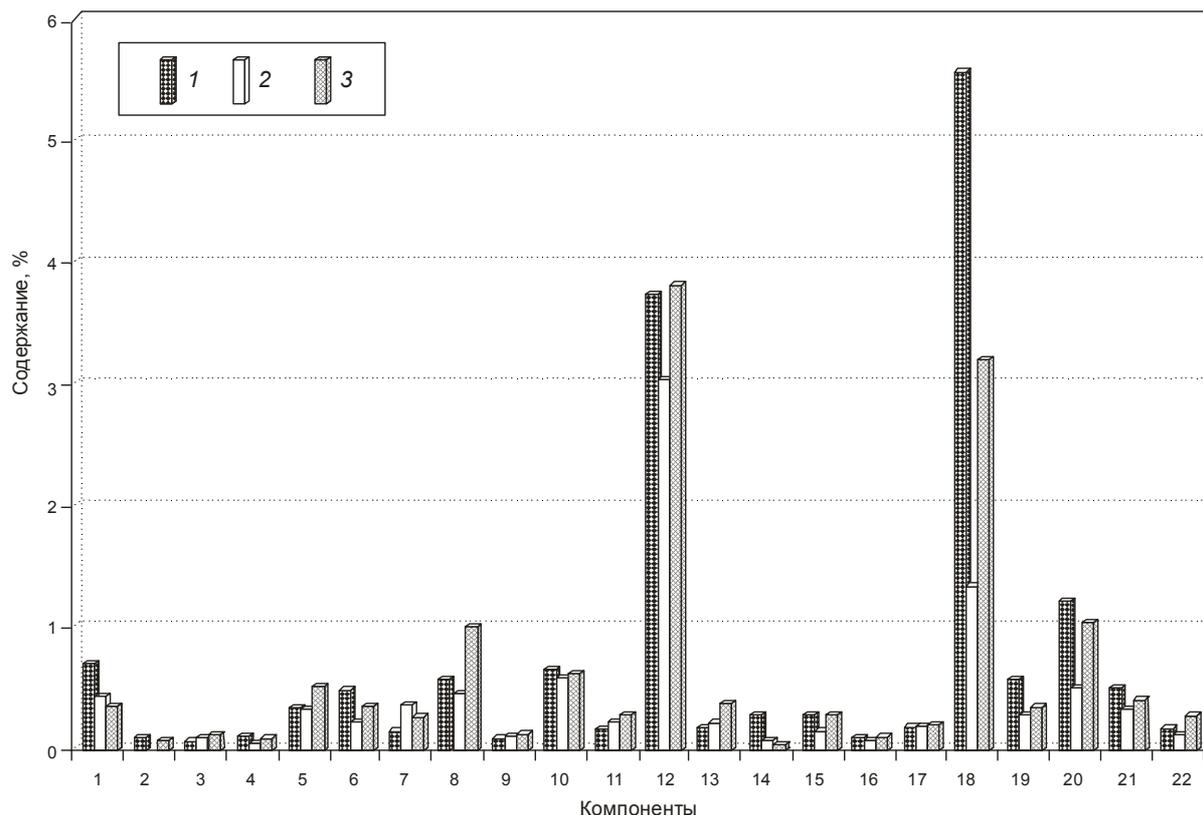


Рис. 3. Содержание фенольных соединений в листьях растений *Lonicera caerulea* L. из разных по геофизическим и геохимическим характеристикам участков (площадь хроматографических пиков в %)

Компоненты: 1 – хлорогеновая кислота (RT = 13.2); 3 – гликозид кверцетина (RT = 16.6); 5 – гликозид лютеолина (RT = 17.7); 6 – гликозид кверцетина (RT = 17.8); 7 – рутин (RT = 18.55); 8 – гликозид лютеолина (RT = 18.7); 10 – гликозид кверцетина (RT = 19.33); 11 – гликозид лютеолина (RT = 19.6); 12 – гликозид лютеолина (RT = 19.84); 13 – рутинозид лютеолина (RT = 20.08); 15 – гликозид апигенина (RT = 20.4); 18 – гликозид хлорогеновой кислоты (RT = 21.3); 19 – гликозид апигенина (RT = 21.9); 20 – гликозид хлорогеновой кислоты (RT = 22.10); 21 – гликозид лютеолина (RT = 22.7); 2, 4, 9, 14, 16, 17, 22 – неидентифицированные компоненты.

1 – аномальная зона-2, т. А-21; 2 – западный склон, т. А-22; 3 – восточный склон, т. А-23

Таблица 6. Содержание отдельных классов фенольных соединений в листьях жимолости на исследуемых участках Молниебойного хребтика (площадь хроматографических пиков в %)

Класс соединений	Аномальная зона-2, т. А-21	Западный склон, т. А-22	Восточный склон, т. А-23
Сумма оксикоричных кислот и их производных	7.46	2.24	4.58
Сумма производных флавонов	6.41	4.67	7.06
Сумма флавонолов и их производных	1.30	1.23	1.28
Всего фенилпропаноидов	15.90	8.55	13.49

Наибольшая концентрация хлорогеновой кислоты и ее производных – гликозидов кверцетина (RT = 17.8), апигенина (RT = 21.9), лютеолина (RT = 22.7) и компонента 14 (см. рис. 3) обнаружена в экстрактах листьев, собранных в т. А-21. В листьях же растений на западном склоне (т. А-22) их количество в большинстве случаев было наименьшим. Для остальных гликозидов (лютеолина, рутинозида лютеолина) и компонента 22

наблюдается другая зависимость – их концентрация увеличивается на восточном склоне (вне зоны магнитной аномалии) на почвах с достаточно низкой удельной радиоактивностью, но повышенным содержанием химических элементов. Концентрация в листьях растений гликозидов кверцетина ($RT = 16.6$; $RT = 19.3$), гликозида апигенина ($RT = 20.4$) и компонентов 9, 16 и 17, практически не зависела от места произрастания жимолости. В т. А-22 (зона с относительно повышенной активностью радионуклидов в почве) в листьях отмечалось незначительное увеличение содержания рутина (см. рис. 3).

Способность флавоноидов противостоять окислительному стрессу связана с тем, что эти соединения могут в отдельных случаях препятствовать запуску окислительных процессов. Предупреждение окислительного стресса имеет место в случае, если катализатором его является интенсивное воздействие на клетки растений ионов тяжелых металлов. Благодаря тому, что флавоноиды очень легко образуют хелатные соединения с металлами, в вакуолях обеспечивается секвестирование (арест) избыточного количества ионов металлов, попадающих в растение из почвы. Считается, что тем самым флавоноидные соединения предупреждают развитие стресса у растений [Skorzinska-Polit et al., 2004; Andersen, Markham, 2006].

Результаты исследований показали, что рост содержания некоторых фенольных соединений в листьях сопровождался увеличением в них концентрации химических элементов. В частности, в т. А-21 с суммой фенилпропаноидов в листьях, а также с суммой оксикоричных кислот оказалось положительно связано содержание Na, Ca, Zn, Cd, Ni. В т. А-23 увеличение содержания суммы производных флавонов происходило одновременно с ростом концентрации Mg, Mn, Sr. Количество хлорогеновой кислоты в листьях жимолости в т. А-21 возрастало параллельно с Fe, Cu, Ni. Можно дать два объяснения этому факту. Либо данные органические соединения используют соответствующие группы элементов в формировании своей структуры, либо, напротив, участвуют в нейтрализации их избыточного количества. В целом обнаруженные зависимости свидетельствуют о наличии связей между биохимическим и элементным химическим составом листьев жимолости.

Повышенная концентрация комплекса химических элементов в листьях растений, по всей видимости, оказывает большее влияние на изменение метаболических процессов, способствующих усилению синтеза фенольных соединений, чем уровень эффективной удельной радиоактивности, характерный для микроучастка на западном склоне. В зоне магнитной аномалии чувствительность растений к повышенным концентрациям химических элементов и радионуклидов, вероятно, увеличивается под влиянием магнитных полей. Воздействие геомагнитных полей на функциональные процессы, в основе которых лежит изменение проницаемости клеточных мембран, ранее отмечалось А.П. Дубровым [1970].

Поскольку удельная активность в изучаемых почвах ПРН (Ra-226, Th-232 и K-40) не превышает значений, характерных для горных областей ($A_{эфф} = 100...200$ Бк/кг), а активность техногенного радионуклида Cs-137 находится в пределах относительно безопасного глобального загрязнения, мы склонны считать, что основное радиационное воздействие на жимолость оказывает Be-7, активность которого в почвах некоторых участков хребтика аномально высокая. Еще большей активностью этого изотопа может быть в самих растениях, так как при выпадении из воздуха он оседает преимущественно на поверхности растений, становясь «ведущим» облучающим изотопом. Во время сильных дождей Be-7 смывается с растений, что уменьшает его радиационное воздействие на их надземную часть, но аккумулируясь в почвах, он воздействует на подземную часть (корни) растений. Из-за короткого времени полураспада (53.3 сут) концен-

трация Ве-7 в растениях и почвах быстро падает. В них остаются естественные радионуклиды, общее радиационное воздействие которых может составлять меньше половины пикового.

Заключение

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о наличии изменений компонентов окружающей среды под воздействием комплекса геолого-геофизических и геохимических факторов, связанных с геологической активностью. В зонах сгущенных дизъюнктивных нарушений наблюдаются аномальные вариации геомагнитного поля, увеличение концентраций радионуклидов и химических элементов, которые влияют на изменение биохимического и физиолого-биохимического состава тканей растений в микропопуляциях *Lonicera caerulea* L.

Возможно, в зоне магнитной аномалии происходит магнитное фракционирование радиоизотопа Ве-7, ведущее к увеличению его концентрации на участке. Не исключено, что в определенных условиях повышенная концентрация Ве-7 в растениях может оказывать мутагенное воздействие, вызывая нарушения репродуктивной сферы и появление тератных форм.

Благодарности

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

- Битам Ф.Т., Каста М., Эйхенбергер Э.М. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир, 1993. 366 с.
- Боярских И.Г. Некоторые аспекты репродуктивной биологии *Lonicera caerulea* L. s. l. в связи с локальными экологическими факторами Горного Алтая // Проблемы и стратегия сохранения биоразнообразия растительного мира Северной Азии: Материалы Всерос. конф. Новосибирск: Офсет, 2009. С. 30–32.
- Дмитриев А.Н., Буслов М.М. Электромагнитные признаки активизации глубинных разломов // Эндогенные процессы в зонах глубинных разломов. Иркутск, 1989. С. 82–83.
- Дмитриев А.Н., Новиков Г.Н., Скавинский В.П. Локальные геолого-геофизические и геохимические исследования тектонофизических зон Горного Алтая. Новосибирск: ОИГГиМ СО РАН, 1989. 40 с.
- Добровольский В.В. Биогеохимия мировой суши: Избр. тр. Т. 3. М.: Науч. мир, 2009. 440 с.
- Дубров А.П. Влияние геомагнитного поля на физиологические процессы у растений // Физиология растений. 1970. Т. 1, вып. 4. С. 836–842.
- Запрометов М.Н. Фенольные соединения и их роль в жизни растений. М.: Наука, 1996. 45 с.
- Ивашикина Н.В., Соколов О.А. Блокирование калиевых каналов клеток тяжелыми металлами и стронцием // Агрохимия. 2006. № 12. С. 47–53.
- Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 300 с.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Бурлаков П.С. Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации геомагнитного поля) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) // Вестн. КРАУНЦ. 2009. № 2, вып. 14. С. 77–89.

- Куценогий К.П. РФА СИ в биогеохимических исследованиях // Актуальные проблемы геохимической экологии: Материалы V Международной биогеохимической школы. Семипалатинск, 2005. С. 55–57.
- Мамаев С.А., Махнев А.К. Изучение популяционной структуры древесных растений с помощью метода морфофизиологических маркеров // Фенетика популяций. М., 1982. С. 140–150.
- Медведев С.С. Кальциевая сигнальная система растений // Физиология растений. 2005. № 2. С. 282–305.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта: Учебник. М.: Астрейя-2000, 1999. 610 с.
- Почвы Горно-Алтайской автономной области. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
- Радиометрические и ядерногеофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие / Л.В. Горбушина, Д.Ф. Зимин, А.С. Сердюкова. М.: Атомиздат, 1970. 376 с.
- Самусенко В.Ф., Гловина Р.Д., Узолин А.И., Иванченко Л.И. Биологический круговорот веществ в орехово-плодовых лесах Юго-Западного Тянь-Шаня. Бишкек, 2005. 97 с.
- Трифонов В.Г. Активная тектоника и геоэкология // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 44–62. (Тр. ГИН РАН. Вып. 511).
- Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос, 1998. 640 с.
- Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
- Flavonoids: chemistry, biochemistry and applications / Eds O.M. Andersen, K.R. Markham. LLC, 2006. 1212 p.
- Larson R.A. The antioxidants of higher plants // Phytochem. 1988. V. 27, N 4. P. 969–978.
- Skorzinska-Polit E., Drazkiewicz M., Wianowska D., Maksymies W., Dawidomicz A.L., Tukiendorj A. The influence of heavy metal on the level of some flavonols in the primary leaves of *Phaseolus coccineus* // Acta Phys. Plant. 2004. V. 26, N 3. P. 247–254.

Сведения об авторах

- БОЯРСКИХ Ирина Георгиевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН. 630090, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, д. 101. Тел.: (383) 334-45-25. E-mail: irina_2302@mail.ru
- СЫСО Александр Иванович** – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. 630099, г. Новосибирск, ул. Советская, д. 18. Тел.: (383) 222-29-77. E-mail: syso@mail.ru
- ХУДЯЕВ Сергей Анатольевич** – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. 630099, г. Новосибирск, ул. Советская, д. 18. Тел.: (383) 222-74-46. E-mail: hudaev@issa.nsc.ru
- БАКИЯНОВ Алексей Иванович** – аспирант, Горно-Алтайский государственный университет. 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, д. 1. Тел.: (38822) 273-59. E-mail: absh_04@list.ru
- КОЛОТУХИН Сергей Прокопьевич** – старший научный сотрудник, ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского». 119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 19, к. 2, кв. 58. Тел. (дом.): (495) 374-83-61. E-mail: lrkfto@mail.ru
- ВАСИЛЬЕВ Владимир Геннадьевич** – кандидат химических наук, научный сотрудник, Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН. 630090, г. Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева, д. 9. Тел.: (383) 330-78-64. E-mail: vgvasil@nioch.nsc.ru
- ЧАНКИНА Ольга Васильевна** – научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения СО РАН. 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3. Тел.: (383) 333-34-99. E-mail: chankina@ns.kinetics.nsc.ru

**SPECIFIC FEATURES OF ELEMENTAL AND BIOCHEMICAL
COMPOSITION OF *LONICERA CAERULEA* L. IN LOCAL
GEOLOGICAL ACTIVE ZONE OF KATUN RANGE
(ALTAI MOUNTAINS)**

**I.G. Boyarskikh¹, A.I. Syso², S.A. Khudyaev², A.I. Bakijanov³,
S.P. Kolotuhin⁴, V.G. Vasiliev⁵, O.V. Chankina⁶**

¹ The Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

² Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

³ The Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia

⁴ Open Society «Krzhizhanovsky Power Institute», Moscow, Russia

⁵ Vorozhtsov Institute of Organic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

⁶ Institute of Chemical Kinetics and Burning, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

Abstract. The paper deals with the results of complex geophysical, soil and agrochemical and biochemical researches conducted in the local geologically active zone of the Altai Mountains. As a result of magnetometric researches, the plots have been distinguished with high-gradient magnetic field where the increase in concentration of individual elements has been noted including those of cosmogeneous origin (Be-7). The dependence has been revealed between mineralogical composition of underlying rocks and concentration of chemical elements in soils and plants on the local plots of geological and geophysical heterogeneity. The change has been revealed in the physiological and biochemical composition of the plant leaves in the zone which is characterized by anomalous values of the magnetic field, increased concentration of radionuclides and macro- and microelements in the soils. It has been supposed about possible influence of the complex of geophysical and soil-geochemical factors which are connected with geological activity, on biochemical metabolism of the plants and mass cyto-embriological disturbances in of the population of *Lonicera caerulea* L. on the plot under study.

Keywords: geomagnetic anomalies, soils, plants, *Lonicera caerulea* L., elemental chemical composition, radioisotopes, radioactivity, phenol compounds.