

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ДОСТУПНОСТЬ ФОСФОРА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ПШЕНИЦЫ (ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

EFFECT OF ACTIVE SILICON FORMS ON PHOSPHOROUS PLANT-AVAILABILITY IN GROWING WHEAT (GREENHOUSE EXPERIMENT)

Ключевые слова: доступный фосфор, двойной суперфосфат, фосфат-анион, силикат-анион, кремний, пшеница, общее содержание фосфора.

Современное сельское хозяйство сталкивается с проблемой снижения эффективности фосфорных удобрений на черноземах. Повышенное содержание в них Ca и Mg способствует быстрой фиксации поступающего с удобрениями фосфора. В ряде работ было показано, что использование кремнийсодержащих препаратов позволяет повысить биодоступность фосфора в почве и обеспечить дополнительное фосфорное питание растений. Целью вегетационного эксперимента было исследование влияния природных кремнийсодержащих минералов (цеолита и мергеля) и их термоактивированных форм на трансформацию соединений фосфора в почве и его поглощение растениями пшеницы при выращивании на черноземе карбонатном. Термоактивирование природных минералов проводили при температуре 700°C в течение 15 мин., что позволило существенно повысить в них содержание активных форм кремния. При раздельном или совместном внесении двойного суперфосфата и кремнийсодержащих минералов наблюдалось увеличение надземной и подземной биомассы. Данный эффект можно объяснить улучшением фосфорного питания растений, так как общее содержание фосфора в корнях и листьях пшеницы увеличилось во всех вариантах вегетационного эксперимента по сравнению с контролем. Наибольшее увеличение содержания фосфора в растительных тканях наблюдалось при совместном внесении суперфосфата и термоактивированного мергеля. Данные фракционного анализа фосфора в почве свидетельствуют, что в варианте с внесением только двойного суперфосфата значительная часть внесённого фосфора трансформировалась в труднорастворимые соединения, тогда как при внесении кремнийсодержащих минералов отдельно или совместно с фосфорным удобрением в почве происходило

уменьшение содержания труднорастворимых фосфатов и увеличение содержания фракций доступного для растений фосфора. Термодинамические расчёты свидетельствуют о возможности реакции замещения фосфат-анионов в фосфатах кальция и магния на силикат-анионы. Таким образом, кремнийсодержащие соединения могут быть использованы для повышения эффективности фосфорных удобрений и улучшения фосфорного питания растений при выращивании на чернозёмах карбонатных.

Keywords: plant available phosphorous, double superphosphate, phosphate-anion, silicate-anion, silicon, wheat, total phosphorous content.

Modern agriculture faces the problem of declining phosphorus fertilizer efficiency in chernozem soils. The increased Ca and Mg content facilitates rapid fixation of phosphorus supplied by fertilizers. Several studies show that the application of silicon-containing chemicals may increase phosphorus bioavailability in the soil and provide additional phosphorus nutrition to plants. The goal of the greenhouse experiment was to study the effect of natural silicon-containing minerals (zeolite and marl) and their thermally activated forms on the transformation of phosphorus compounds in the soil and phosphorus uptake by wheat plants grown on carbonate chernozem soil. Thermal activation of the natural minerals was carried out at 700°C for 15 minutes which significantly increased their content of active silicon forms. With separate or combined application of double superphosphate and silicon-containing minerals, increase of above-ground and underground biomass was observed. This effect may be explained by improved plant phosphorus nutrition, as the total phosphorus content in wheat roots and leaves increased in all variants of the experiment compared to the control. The greatest increase of phosphorus content in plant tissues was observed with the combined application of superphosphate and thermally activated marl. The data of the fractional analysis of

phosphorus in the soil indicated that in the variant with the application of double superphosphate alone, a significant portion of the applied phosphorus was transformed into poorly soluble compounds, whereas the application of silicon-containing minerals, either separately or in combination with phosphorus fertilizer, resulted in decreased content of poorly soluble phosphates and increase of the content of plant-available phosphorus frac-

tions. Thermodynamic calculations indicate the possibility of a substitution reaction of phosphate anions in calcium and magnesium phosphates by silicate anions. Thus, silicon-containing compounds may be used to increase the effectiveness of phosphorus fertilizers and improve the phosphorus nutrition of plants grown on carbonate chernozems.

Матыченков Владимир Викторович, д.б.н., вед. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пущино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

Бочарникова Елена Афанасьевна, к.б.н., ст. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пущино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: mswk@rambler.ru.

Косачев Иван Алексеевич, к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

Matyuchenkov Vladimir Viktorovich, Dr. Bio. Sci., Leading Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

Bocharkova Elena Afanasevna, Cand. Bio. Sci., Senior Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: mswk@rambler.ru.

Kosachev Ivan Alekseevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

Введение

Проблема низкой биодоступности фосфора (Р) в карбонатных черноземах представляет собой значимую проблему для современного растениеводства. Химические особенности этих почв, в частности высокое содержание по кальцию и магнию, обусловливают быстрый переход растворимых фосфатов в формы, недоступные для питания растений [1]. В результате эффективность фосфорных удобрений часто не превышает 20-30% от внесенного фосфора, остальная его часть иммобилизуется в почвенном профиле [1].

Во многом решением этой проблемы является использование кремнийсодержащих препаратов, способных модифицировать фосфатный статус почв [2]. Механизм их действия предполагает конкурентное вытеснение фосфат-ионов силикат-ионом в соединениях Ca, Mg, Fe и Al через реакцию замещения. Эффективность такого процесса напрямую зависит от способности внесенных препаратов поставлять в

почвенный раствор мономеры кремниевой кислоты [3].

Однако традиционно используемые в сельском хозяйстве кремнийсодержащие минералы (диатомиты, мергели, цеолиты и др.) не способны обеспечивать высокую концентрацию активных форм Si в почвенном растворе, что служит причиной их низкой эффективности и требует внесение высоких доз (от 1 т на 1 га и выше), снижающих экономическую эффективность их применения. Одной из технологий модификации или активации Si-содержащих минералов является кратковременная термическая обработка. Данный процесс обеспечивает изменение структуры кристаллической решетки и повышение растворимости кремния [4].

Целью исследования – изучение влияния цеолита (Ц) и мергеля (М) и их термически активированных форм на трансформацию соединений фосфора в почве и поглощение Р растениями пшеницы в условиях вегетационного опыта.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны следующие кремнийсодержащие минералы:

- 1) цеолит (Хотынецкое месторождение, ОАО «Промцеолит», Орловская область) (Ц);
- 2) термически активированный цеолит (А-Ц);
- 3) мергель (Майнское месторождение, РуЭкоОрганикс, Чебоксары, Чувашская республика) (М);
- 4) термически активированный мергель (А-М).

Физико-химические свойства тестируемых кремнийсодержащих минералов представлены в таблице 1. Термическую обработку цеолита и мергеля проводили при температуре 700°C в течение 15 мин. в муфельной печи. Как было установлено в наших предыдущих исследованиях, такой режим обеспечивает максимальное увеличение растворимости кремния [4]. При термической обработке химический состав минералов не изменялся.

Таблица 1

Некоторые физико-химические свойства кремнийсодержащих минералов, %

Минерал	SiO ₂	TiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	pH
Цеолит	71,5	0,09	12,5	0,9	2,5	1,2	1,5	0,4	0,5	6,5
Мергель	56,6	0,02	19,6	2,3	13,3	1,9	1,8	0,2	0,2	6,4
НСР ₀₅	2,5	0,01	1,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,1	0,2	0,2

В качестве источника фосфора был взят химически чистый моногидрат дигидроортфосфата кальция Ca(H₂PO₄)₂·H₂O (двойной суперфосфат) (ДС).

Для оценки потенциальной эффективности кремнийсодержащих минералов в качестве источника активных форм кремния использовали содержание монокремниевой кислоты в 24-часовом и 4-суточном водных экстрактах, характеризующее содержание актуального кремния в исследуемом материале, и содержание мономеров кремниевой кислоты в 0,1 н соляной кислоте, характеризующее уровень потенциально доступного кремния. Для определения содержания активного кремния в кремнийсодержащих минералах применяли следующее уравнение:

$$\text{ActSi} = 10 \times (\text{AcSi}_{1\text{сут}} + \text{AcSi}_{4\text{сут}}) + \text{PtnSi},$$

где ActSi – активный кремний;

AcSi – актуальный кремний;

PtnSi – потенциальный кремний.

Кремниевое состояние почвы после проведения эксперимента оценивали по содержанию монокремниевой кислоты в 24-часовом водном экстракте и в экстракте 0,1 н соляной кислотой [6]. Содержание активного кремния в почве рассчитывали с помощью уравнения:

$$\text{ActSi} = 10 \times (\text{AcSi}_{1\text{сут}} + \text{AcSi}_{4\text{сут}}) + \text{PtnSi}.$$

Вегетационные исследования проводили в 2025 г. в теплице Института фундаментальных проблем биологии РАН (г. Пущино) на озимой пшенице (*Triticum aestivum* L) сорта Юка. В качестве грунта использовали образцы верхнего горизонта чернозёма карбонатного целинного, отобранные в Ульяновской области. Почва имела содержание обменного кальция 45 мг-экв/100 г почвы и обменного магния 12 мг-экв/100 г почвы; общее содержание кальция 860 мг/100 г почвы и магния 150 мг/100 г почвы; pH=7,9; содержание органического вещества Сорг 2,4%. Растения выращивали в литровых пластиковых сосудах. Эксперимент включал следующие варианты:

- 1) контроль;
- 2) двойной суперфосфат (ДС) – 200 кг/га (0,2 г на сосуд);
- 3) цеолит (Ц) – 200 кг/га (0,2 г на сосуд);
- 4) активированный цеолит (АЦ) – 200 кг/га (0,2 г на сосуд);
- 5) мергель (М) – 200 кг/га (0,2 г на сосуд);
- 6) активированный мергель (АМ) – 200 кг/га (0,2 г на сосуд);
- 7) ДС + Ц – по 200 кг/га каждый;
- 8) ДС + АЦ – по 200 кг/га каждый;

- 9) ДС + М – по 200 кг/га каждый;
 10) ДС + АМ – по 200 кг/га каждый.

Перед посадкой семена пшеницы замачивали в 3%-ном растворе H_2O_2 , промывали в дистиллированной воде и замачивали на 24 ч при температуре 20°C в тёмном шкафу. Затем семена высевали по 10 шт. на сосуд. Растения выращивали в течение 4 недель при норме полива 50 мг воды на сосуд в день. Температура воздуха в теплице составляла 26±2°C в дневное время и 24±2°C в ночное. Фотопериод составлял 12 ч при интенсивности фотосинтетически активной радиации 950 мкмоль фотонов· $m^{-2}\cdot s^{-1}$. Относительная влажность воздуха находилась в пределах 85±5% днём и 75±5% ночью.

В конце эксперимента измеряли надземную и подземную биомассу растений и общее содержание фосфора в корнях и листьях пшеницы. В почве анализировали содержание монокремниевой кислоты, кислоторастворимого кремния, а также делали фракционный анализ фосфора по методике Ротамстедской опытной станции, разработанной для щелочных почв [5]. Фракционный анализ проводили методом последовательной экстракции. Для извлечения непрочно- и прочносвязанных форм фосфора предварительно высушеннную, размолотую и просеянную через сите 1 мм навеску почвы 1 г последовательно обрабатывали различными экстрагентами. Для получения первой фракции (водорасстворимый фосфор) к навеске добавляли 50 мл дистиллированной воды и встряхивали в течение 1 ч. После центрифугирования в растворе

определяли содержание фосфора. Вторую фракцию (Al-связанный фосфор) извлекали добавлением к осадку 50 мл 0,5 М NH_4F с последующим встряхиванием в течение 1 ч и центрифугированием. Третью фракцию (Fe-связанный фосфор) получали путем обработки осадка 50 мл 0,1 М $NaOH$ и встряхиванием в течение 17 ч. Для определения четвертой фракции (Са-связанный фосфор) к осадку добавляли 50 мл 0,5 М H_2SO_4 и встряхивали в течение 1 ч. Для анализа пятой фракции (остаточный фосфор) почвенный осадок помещали в коническую колбу, добавляли 40 мл концентрированной соляной кислоты и кипятили на плитке в течение 15 мин. После охлаждения раствор количественно переносили в мерную колбу на 50 мл, фильтровали и в фильтрате определяли содержание фосфора.

Полученные данные анализировали с использованием теста Дункана при 5%-ном уровне значимости [6]. Для всех полученных результатов была рассчитана наименьшая существенная разница при 95%-ном уровне вероятности (HCP_{05}).

Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлены кремниевые показатели исходных и термо-активированных минералов. Как свидетельствуют полученные результаты, термическая обработка обеспечила существенное увеличение содержания водорасстворимого кремния и незначительно повлияла на содержание кислоторастворимого кремния.

Таблица 2

Содержание кремния в исследуемых минералах

Минерал	Водорасстворимый кремний		Кислоторастворимый кремний Si, мг/кг	Активный кремний
	1 сут.	4 сут.		
Ц	26,4	26,8	483,6	1016,5
АЦ	67,9	69,3	497,3	1869,3
М	34,8	37,8	329,4	1052,4
АМ	80,5	138,6	401,2	2592,2
HCP_{05}	3,5	5,6	25,8	59,4

Во всех вариантах с внесением ДС и кремнийсодержащих препаратов наблюдалось увеличение веса корней и надземных частей пшеницы по сравнению с контролем (табл. 3). Наименьшее увеличение зафиксировано в варианте с внесением необработанного цеолита. Также установлено статистически достоверное увеличение общего содержания фосфора в корнях и листьях пшеницы. Максимальное увеличение наблюдалось при совместном внесении ДС и А-М.

Фракционный анализ почвы после проведения вегетационного эксперимента представлен в

таблице 4. Полученные данные показывают, что внесение ДС существенно повысило содержание фосфора во всех фракциях. При внесении кремнийсодержащих минералов произошло перераспределение фосфора во фракциях при сохранении суммарного содержания фосфора в почве. Установлено увеличение содержания фосфора в 1-й, 2-й и 3-й фракциях, в которые переходят формы, участвующие в питании растений, и уменьшение в 4-й и 5-й фракциях, отражающих содержание труднодоступных форм фосфора.

Таблица 3

Влияние внесения двойного суперфосфата и кремнийсодержащих минералов на сухой вес пшеницы и общее содержание фосфора в растениях, г/раст.

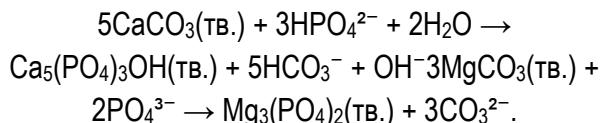
Вариант	Сухой вес				Общее содержание фосфора, %			
	корни	листья	корни	листья	корни	листья	корни	листья
	г/раст.	% от контроля		%		% от контроля		
Контроль	2,45	1,25	100,0	100,0	5,85	4,23	100,0	100,0
ДС	3,07	1,71	125,2	136,5	7,88	5,86	135,2	138,5
Ц	2,50	1,29	102,2	103,5	6,05	4,35	103,8	102,8
АЦ	3,34	1,55	136,5	124,2	7,55	5,01	129,5	118,5
М	2,61	1,34	106,4	106,8	6,16	4,47	105,6	105,6
АМ	3,40	1,59	138,6	126,8	8,33	5,48	142,8	129,5
ДС+Ц	3,57	1,70	145,8	135,8	9,05	5,79	155,2	136,8
ДС+АЦ	3,84	1,86	156,8	148,5	9,49	6,32	162,8	149,5
ДС+М	3,39	1,62	138,5	129,5	8,33	5,60	142,8	132,5
ДС+АМ	3,98	1,91	162,5	152,8	10,06	6,89	172,5	162,8
НСР ₀₅	0,12	0,14			0,29	0,35		

Таблица 4

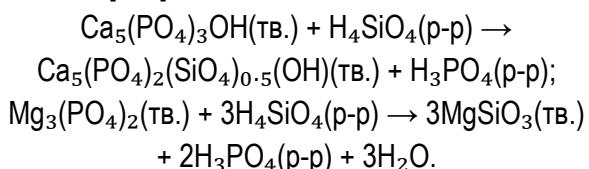
Фракционный анализ фосфора в почве

Вариант	Фракции фосфора					Сумма
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	
Контроль	42,4	83,2	123,4	822,4	234,5	1308,9
ДС	65,2	102,5	126,9	825,6	489,3	1609,5
Ц	52,3	86,7	124,5	815	226,3	1304,8
АЦ	58,04	88,4	126,5	812,3	220,66	1305,9
М	52,7	84,5	124,5	814,2	236,8	1312,7
АМ	59,7	89,6	127,5	803,5	222,5	1302,8
ДС+Ц	68,6	112,3	132,5	835,6	463,5	1612,5
ДС+АЦ	75,8	128,5	142,5	845,2	416,6	1608,6
ДС+М	69,5	113,5	138,5	845,6	438,4	1605,5
ДС+АМ	78,9	135,8	149,5	865,4	383,1	1612,7
НСР ₀₅	5,6	10,2	13,5	25,6	20,5	150,5

Очевидно, что при внесении двойного суперфосфата в чернозем карбонатный, характеризующийся высоким содержанием карбонатов кальция и магния, значительная часть внесенного фосфора трансформировалась в труднорастворимые соединения:



Использование кремниевых минералов повысило содержание фосфора во фракциях, обеспечивающих фосфорное питание растений, и уменьшило содержание труднорастворимых соединений фосфора в почве. В нашей предыдущей работе были представлены термодинамические расчёты реакций замещения фосфат-аниона на силикат-анион в соединениях кальция и магния [2, 3]:



Таким образом, можно объяснить эффект трансформации труднорастворимых фосфатов в доступные для растений формы при внесении кремниевых минералов. Наибольший эффект наблюдался при использовании термоактивированного мергеля, который содержал наибольшее количество активного кремния в форме монокремниевой кислоты.

Выводы

1. Внесение кремниесодержащих природных и модифицированных минералов позволяет повысить доступность фосфора в чернозёме карбонатном при внесении и без внесения фосфорных удобрений.

2. Действие кремниевых минералов можно объяснить образованием кремниевой кислоты и протеканием конкурирующей реакции между фосфат-анионом и силикат-анионом при взаимодействии с карбонатами кальция и магния.

3. Кремниесодержащие минералы могут быть использованы в практике сельского хозяй-

ства для повышения эффективности применения фосфорных удобрений.

Библиографический список

1. Шафран, С. А. Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений / С. А. Шафран. – Текст: непосредственный // Агрохимия. – 2015. – № 3. – С. 26-33.
2. Uhuegbue, P., Stein, M., Kalbitz, K., Schaller, J. (2024). Silicon effects on soil phosphorus availability: results obtained depend on the method used. *Frontiers in Environmental Science*. 12. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1461477.
3. Зинковская, Т. С. Значение кремния и кремниевых удобрений в сельском хозяйстве / Т. С. Зинковская, Г. Ю. Рабинович, Е. А. Подолян. – Текст: непосредственный // Плодородие. – 2024. – № 1 (136). – С. 26-31.
4. Bocharnikova, E., Demin, D., Matichenkov, V. (2024). New Silicon-Rich Mineral-Based Materials and Their Use for Remediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Inorganic Materials: Applied Research*. 15. 375-382. DOI: 10.1134/S2075113324020114.
5. McDowell, R.W., Sharpley, A., Brookes, P., Poulton, P. (2001). Relationship between Soil Test Phosphorus and Phosphorus Release to Solution. *Soil Science*. 166. DOI: 10.1097/00010694-200102000-00007.
6. Duncan D B. (1975). *T tests and intervals for comparisons suggested by the data*. *Biometrics*. 31 (4): 339-359.

References

1. Shafran, S. A. Vliyanie tipa pochv i soderzhaniya v nikh podvizhnykh fosfatov na effektivnost' fosfornykh udobreniy // Agrokhimiya. – 2015. – No. 3. – S. 26-33.
2. Uhuegbue, P., Stein, M., Kalbitz, K., Schaller, J. (2024). Silicon effects on soil phosphorus availability: results obtained depend on the method used. *Frontiers in Environmental Science*. 12. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1461477.
3. Zinkovskaya, T. S., Rabinovich, G. Yu., Podolyan, E. A. Znachenie kremniya i kremnievykh

udobreniy v selskom khozyaystve // Plodorodie. – 2024. – No. 1 (136). – S. 26-31.

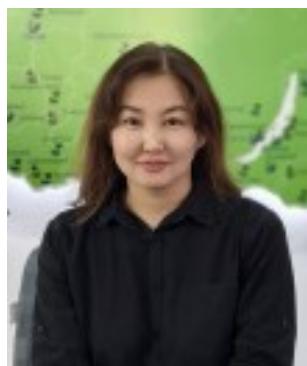
4. Bocharnikova, E., Demin, D., Matichenkov, V. (2024). New Silicon-Rich Mineral-Based Materials and Their Use for Remediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Inorganic Materials: Applied Research.* 15. 375-382. DOI: 10.1134/S2075113324020114.

5. McDowell, R.W., Sharpley, A., Brookes, P., Poulton, P. (2001). Relationship between Soil Test

Phosphorus and Phosphorus Release to Solution. *Soil Science.* 166. DOI: 10.1097/00010694-200102000-00007.

6. Duncan D B. (1975). *T tests and intervals for comparisons suggested by the data.* *Biometrics.* 31 (4): 339-359.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» в рамках научного проекта по договору № ЕП-109-3-25-223-2076.



УДК 634.723.1

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-253-11-19-25

Н.А. Васильева, Н.К. Гусева, А.В. Чирипов
N.A. Vasileva, N.K. Guseva, A.V. Chiripov

НОВЫЙ СОРТ ЖИМОЛОСТИ СИНЕЙ ХАТАН ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

NEW VARIETY OF SWEET-BERRY HONEYSUCKLE KHATAN FOR THE BAIKAL REGION

Ключевые слова: сорт Хатан, жимолость синяя, селекция, зимостойкость, урожайность, масса ягод, содержание БАВ, дегустационная оценка.

Цель исследования заключается в создании сорта жимолости синей с комплексом хозяйственных признаков. Сорт жимолости синей Хатан был выведен с применением аналитического метода селекции, считающегося одним из наиболее эффективных в современной практике. Ему присвоен селекционный номер 3-7-10. В качестве родительских форм использовались сорта Герда и Берель. Авторами сорта являются Васильева Наталья Александровна и Гусева Надежда Кондратьевна. Исследования по выведению нового сорта жимолости синей Хатан проводились в период с 2019 по 2024 гг. Новый сорт имеет среднерослый, среднераскидистый куст. Побеги имеют среднюю длину, прямую форму, светло-зеленый цвет и матовую неопущенную по-

верхность. Почки также средней величины, с заостренной верхушкой, светло-коричневого цвета с легким красноватым оттенком. Листья удлиненно-овальные, цельные. Цветки крупные, окрашены в бледно-желтые тона. Ягоды крупные, удлиненно-овальной формы, темно-синие с голубым налетом. Характер вкуса кисло-сладкий, нежный, с ароматом. В ходе исследований установлено, что новый сорт жимолости синей Хатан отличается высоким уровнем адаптации и устойчивости к комплексу неблагоприятных природных факторов. В условиях испытаний сорт демонстрировал стабильное развитие и хорошее состояние растений на протяжении всего периода наблюдений. Урожайность ягод составляет 3,2 кг с 1 куста, средняя масса ягод 1,1 г, что на 0,2 г превышает контрольные показатели. Транспортабельность ягод оценивается как средняя. Сорт имеет универсальное назначение. В ягодах высокое содержание БАВ. Данный сорт подходит для техноло-