

ВЛИЯНИЕ ПОГОДЫ И КЛИМАТА НА УРОЖАЙНОСТЬ СОИ В АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

П.А. Шарый^{1,2}, д.б.н., О.В. Рухович¹, д.б.н., Л.С. Шарая¹, д.б.н.

¹ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия,
127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, 31а;

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия
E-mail: o_rukhovich@mail.ru

Проведен анализ связей урожайности сои в 18 районах Амурской области с показателями погодных условий, усредненными за 12 лет опыта, и с климатическими нормами. Уравнения множественной регрессии показали тесную связь урожайности сои как с погодой, так и с климатом ($R^2 = 0,935$ и $R^2 = 0,949$ соответственно). В уравнении с погодой наиболее значимым фактором была дневная температура T_{max} июля, в уравнении с климатом – фактор, характеризующий среднегодовые климатические условия. Повышение в регионе T_{max} июля на 1°C приводило к росту урожайности сои на 24% (2,8 ц/га), а увеличение годовой амплитуды осадков (разности между максимальными и минимальными месячными осадками) на 5 мм – к росту урожайности на 17% (2,0 ц/га).

Ключевые слова: соя, погода, климатические нормы, множественная регрессия.

Для цитирования: Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Влияние погоды и климата на урожайность сои в Амурской области// Плодородие. – 2025. – №5. – С. 85-88. DOI: 10.25680/S19948603.2025.146.16.

Хотя Россия занимает восьмое место в мире по производству сои, сбор этой богатой белком и маслом бобовой культуры за последние 5 лет увеличился в стране примерно на 53% [1], причем за это время сортовой состав сои на Дальнем востоке обновился на 90% [2]. Успех селекции новых сортов сои во многом обусловлен пониманием того, как погодные и климатические условия влияют на ее урожайность. Несмотря на множество исследований, например [3–7], климатические изменения и появление новых тенденций оставляют вопросы без ответов.

Для выявления закономерностей, ведущих факторов среды и нахождения статистически значимых связей исследователи используют погоду и климат, т.е. погоду, рассматриваемую за 30 лет и более. Поэтому изучают связь урожайности сои как с климатом [5, 6], так и с погодой [3, 4, 7]. Хотя связь урожайности с усреднённой за 10 лет погодой может объяснять до 98% дисперсии урожайности сои [7], погода может демонстрировать различные отклонения от климатических норм, и эта связь может существенно меняться.

Дневные и ночные температуры часто взаимосвязаны. Для отдельного изучения их влияния на сельскохозяйственные культуры проводят эксперименты в лабораториях [8] или на полях. В лабораторных исследованиях повышают ночную температуру, используя пассивный подогрев [9].

Тесная связь урожайности сои с погодой не означает, что роль агротехнологий мала: по-видимому, они сами тесно связаны с климатическими нормами, которые их как бы и «представляют».

В качестве факторов среды, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур, нередко используют дневную (T_{max}) и ночную (T_{min}) температуры. Их разность, суточный перепад температур DTR (diurnal temperature range) при глобальном потеплении уменьшается, поскольку T_{min} возрастает примерно вдвое

быстрее, чем T_{max} [10]. Поэтому DTR уменьшается, и также может служить важным предиктором, отражающим эффекты потепления.

Цель нашего исследования – изучить влияние погоды (за 12 лет) и климата (за 50 лет) на урожайность сои в Амурской области, а также установить причины различия.

Методика. Данные об урожайности сои за 12 лет (2012–2023 г.) получены из базы данных муниципальных образований и усреднены за эти 12 лет. Информация о погоде по каждому из 18 районов (16 в Амурской области и 2 в Еврейской автономной области) основана на данных метеостанций. Средние за 50 лет (1950–1999 г.) данные о базовом климате за каждый месяц взяты из базы данных WorldClim [11], и из них рассчитаны средние по каждому из этих районов. Гидротермический коэффициент (ГТК) теплого периода (май–сентябрь) оценивался по месячным данным как $ГТК = \sum P_i / (0,1 \sum 30 T_{max}_i)$, где суммы представлены по месяцам. Данные о рельефе взяты из базы данных SRTM30. Характеристики рельефа рассчитаны по методике [12], где дано их детальное описание. Это сделано с помощью программы «Аналитическая ГИС Эко».

Уравнения множественной регрессии рассчитывали методом наименьших квадратов. При этом отбирались те четыре линейно независимых предиктора (пятый предиктор обычно незначим в модели), для которых наблюдался наибольший коэффициент детерминации R^2 . Линейная независимость предикторов проверялась по критерию, описанному в [13]. Любые четвёрки линейно независимых предикторов исключались из рассмотрения. Выбор предикторов, таким образом, не зависел от предпочтений авторов.

Для оценки вклада предикторов использовали t -статистики Стьюдента; относительный вклад i -го предиктора (%) оценивался по формуле $100|t_i|/\sum|t_i|$. Предикторы в моделях, приведенных ниже, расположены в

порядке убывания их вклада (первый – главный предиктор).

Результаты и их обсуждение. Проведём сравнение показателей базового климата и средних показателей погоды за 12 лет исследований. Характер распределения месячных осадков в году за это время остаётся близким к распределению климатических норм, однако значительно выросло количество осадков каждого месяца (рис. 1). Рост годовой суммы осадков составил 258 мм, или 44% от нормы при наибольшем росте в июле. ГТК теплого периода вырос от 1,48 для времени оценки климатических норм (1950–1999 г.) до 2,04 для времени опыта.

Распределение среднесуточных температур T_{mean} в году сохранилось. Среднегодовая T_{mean} выросла по сравнению с нормой на $1,83^{\circ}\text{C}$; наиболее заметно – в марте (на $4,0^{\circ}\text{C}$), менее всего в летние месяцы и в начале осени (рис. 2). Меньше, чем среднесуточная, выросла дневная температура T_{max} – на $1,19^{\circ}\text{C}$, более чем на $2,0^{\circ}\text{C}$ увеличилась температура периода январь-март, менее чем на $0,22^{\circ}\text{C}$ – июнь и октябрь. В отличие от этих температур рост ночной температуры T_{min} оказался самым заметным, на $2,75^{\circ}\text{C}$, при этом на $5,0^{\circ}\text{C}$ поднялась температура в марте, менее чем на $2,5^{\circ}\text{C}$ повысились температуры летних месяцев и начала осени (рис. 2).

Связи урожайности сои с нормами осадков и с осадками периода опыта не совпадают. Связи с суммами

осадков в базовый период практически не меняются от месяца к месяцу и положительны с $r > 0,6$. Исключение составляет ноябрь, когда дневная температура, как и ночная, становится отрицательной, и осадки не способствуют запасанию влаги в почве, что негативно сказывается на урожайности. Теснота связей с суммами месячных осадков в период опыта в целом снижается и меняет знаки в течение года (рис. 3).

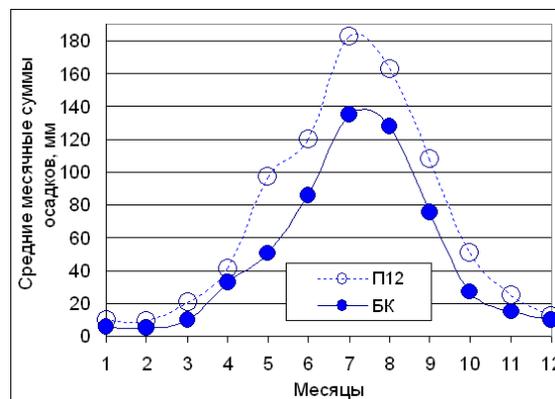


Рис. 1. Распределение среднемесячных сумм осадков в году для базового климата (БК) и погодных условий опыта (П12)

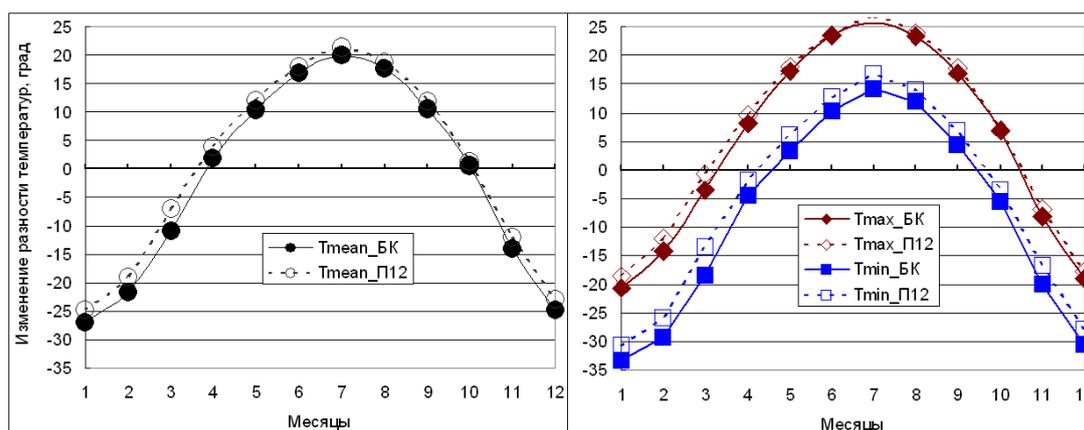


Рис. 2. Распределение среднесуточных T_{mean} (слева), дневных T_{max} и ночных T_{min} (справа) месячных температур в году для базового климата (БК) и периода опыта (П12).

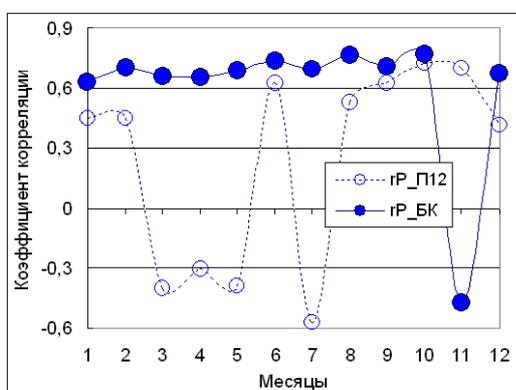


Рис. 3. Коэффициенты корреляции урожайности сои с месячными осадками; БК – базового климата, П12 – периода опыта

Связи со среднесуточными температурами для базового климатического периода достаточно тесные, особенно в вегетационный период. Связи со средними за 12 лет среднесуточными температурами близки по распределению к базовым и немного более тесные, чем с

нормами (рис. 4). Исключение составляет июнь, для которого наблюдается некоторое снижение тесноты связей в обоих периодах.

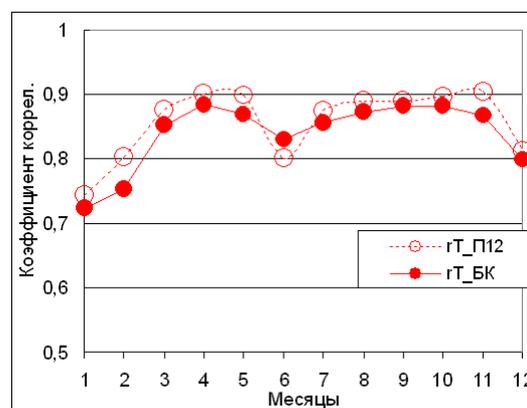


Рис. 4. Коэффициенты корреляции урожайности сои со среднесуточными температурами; БК – базового периода, П12 – периода опыта

В период опыта заметно снизился по сравнению с нормами суточный перепад температур DTR : среднегодовой DTR уменьшился на $1,56^{\circ}\text{C}$ (от $12,81$ до $11,25^{\circ}\text{C}$), но характер распределения DTR по месяцам не изменился (рис. 5).

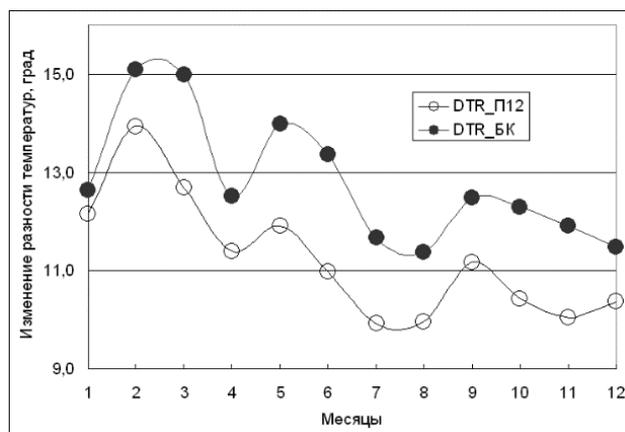


Рис. 5. Распределение суточного перепада температур DTR по месяцам; БК – базовый климат, П12 – период опыта

Климатический тренд участка исследования можно охарактеризовать как термогумидный, при котором происходит рост как температур, так и осадков. При использовании средних за 12 лет показателей погоды урожайность сои Y_w описывается уравнением

$$Y_w = 3,776Tmax_{07} - 5,958DTR_{10} - 0,9079DTmin + 0,6155P_{02} + 10,70; \\ R^2 = 0,935; P < 10^{-6}, \quad (1)$$

где $Tmax_{07}$ – дневная температура июля, DTR_{10} – суточный перепад температур октября, $DTmin$ – годовая амплитуда ночной температуры, P_{02} – осадки февраля. Уравнение (1) показывает, что урожайность сои увеличивается с ростом $Tmax_{07}$, при снижении DTR_{10} , при снижении $DTmin$ и с ростом осадков P_{02} февраля – самого сухого месяца. Эти предикторы объясняют 94% дисперсии урожайности сои.

Для изучаемой выборки $Tmax_{07}$ составила $26,6^{\circ}\text{C}$, что выше нормы на $0,8^{\circ}\text{C}$. $Tmax_{07}$ является главным предиктором в модели (1), объяснявшим почти половину (45,9%) дисперсии урожайности сои. Поскольку дневная температура и солнечная радиация тесно связаны [14], различить их влияние трудно. Возрастание $Tmax_{07}$ на 1°C приводило в Амурской области к росту урожайности сои на 24%, или на 2,84 ц/га. В США известна оценка 17% влияния среднесуточной температуры $Tmean$ вегетационного периода на урожайность сои [15], но там урожайность сои падала с ростом температуры, а в Амурской области – росла (см. рис. 4). Видимо, это объясняется недостатком тепла или радиации в Амурской области и избытком – в США.

Предиктор DTR_{10} на 25,8% объясняет дисперсию урожайности сои. Значение DTR_{10} в период опыта было на $1,85^{\circ}\text{C}$ ниже нормы в основном из-за повышения $Tmin_{10}$ на $2,07^{\circ}\text{C}$. Уменьшение ночной температуры $Tmin_{10}$ (и значит рост DTR_{10}) препятствует накоплению почвенной влаги в октябре. Отсюда – отрицательный знак связи урожайности сои с DTR_{10} в (1).

Амплитуда $DTmin$ объясняет 14,7% дисперсии урожайности. Эта амплитуда повышена в опыте относительно нормы на $2,75^{\circ}\text{C}$. Наиболее заметно, на $2,87^{\circ}\text{C}$, повысилась $Tmin$ поздней осенью и зимой – в период запасаения влаги, что, как и в случае с DTR_{10} , не

способствует сохранению почвенной влаги и поэтому знак связи $DTmin$ с урожайностью сои в модели (1) отрицательный.

Осадки февраля $Prec_{02}$ объясняют 13,6% дисперсии урожайности сои. До потепления (норма) средние по выборке осадки февраля составляли 5,1 мм, после потепления – 9,2 мм. Связь урожайности с P_{02} положительна, то есть влияние роста зимних осадков на урожайность сои в регионе позитивна.

Объяснение практически всей дисперсии на 94% урожайности сои выявленными погодными факторами ставит вопрос о роли и влиянии агротехнологии. В качестве предикторов не использовали удобрения, но предполагали, что влияние их косвенно отражает климатические характеристики. Подтверждают это предположение и зарубежные результаты в уравнении множественной регрессии для связи урожаев сои и климата в штате Иллинойс (США) за 75 лет, климат объяснял 84% дисперсии урожаев без учёта агротехнологий [5]; метеорологические данные объясняли 98% дисперсии урожаев сои в Индии также без учета агротехнологий [7]. В работах [16-19], где проведено сравнение урожайности трех выборок озимой пшеницы, без удобрений, с неоптимальными и оптимальными дозами удобрений, показано, что урожайность с оптимальными дозами удобрений сильнее зависит от радиации на хорошо освещённых и прогреваемых юго-западных склонах, чем урожайность на контроле и с неоптимальными дозами.

Урожайность сои Y_{cl} при использовании показателей базового климата, усреднённых за 50 лет, описывается уравнением

$$Y_{cl} = 0,7147 \cdot DPrec - 4,014 \cdot DTR_{11} + 10,30 \cdot DTR_{04} + 5,521 \cdot H + 162,4; \\ R^2 = 0,949; P < 10^{-6}, \quad (2)$$

где $DPrec$ – средняя многолетняя годовая амплитуда сумм осадков, т.е. разность между наибольшими и наименьшими месячными осадками; DTR_{11} и DTR_{04} – суточный перепад температур в ноябре и в апреле соответственно; H – средняя кривизна, которая является характеристикой рельефа, описывающей средневыпуклые и средневогнутые формы поверхности [12].

Уравнение (2) показывает, что рост $DPrec$ увеличивает урожайность сои; линейный тренд указывает, что увеличение $DPrec$ на 5 мм увеличивает урожайность в среднем на 17%, или на 1,95 ц/га. Рост DTR_{11} снижает урожайность: при росте DTR_{11} на 1°C урожайность падает в среднем на 21%, или на 2,5 ц/га. В ноябре дневная температура меняет знак и снижается по сравнению с октябрём на 14°C , что способствует замерзанию и консервированию почвенной влаги. По этой причине снижение DTR_{11} может способствовать запасанию влаги в почве, а впоследствии – росту урожайности. Рост DTR_{04} в апреле – месяце смены знака дневной температуры – также способствует обогащению влагозапасов в почве. Средняя кривизна H со знаком «+» в уравнении (2) могла бы означать некоторый рост на средневыпуклых формах, однако этот предиктор статистически незначим. Дисперсия урожайности Y_{cl} на 38,4% объясняется $DPrec$, на 29,3 – DTR_{11} , на 27,3 – DTR_{04} и на 5,0% – средней кривизной H .

В модель (2) вошли факторы, которые не являются характеристиками вегетационного периода и характеризуют предшествующий ему период. Как известно, осенне-зимний период является накопителем влагозапасов, и рост разности между положительной дневной и отрицательной ночной температурами в апреле

способствует более быстрому размораживанию почвы и обогащению её влагой перед посевом в мае. Отражение влияния предпосевного периода в регрессионных моделях известно [20].

Заключение. Выявлены близкие по тесноте связи урожайности сои с климатом факторы среды 12-летнего опыта ($R^2 = 0,94$) и базового климата ($R^2 = 0,95$). Повышение дневной температуры июля в Амурской области на 1°C приводило к росту урожайности сои на 24% (2,8 ц/га). Ведущие факторы среды при использовании погоды и климатических норм были разными. Это связано с изменениями осадков и температуры за время от определения норм до опыта. В модели с погодой главным фактором среды была дневная температура июля, модель с климатом содержит показатели климата, связанные с запасанием влаги в почве. Увеличение годовой амплитуды осадков на 5 мм приводило к росту урожайности на 17% (2,0 ц/га). Можно считать, что эти модели дополняют друг друга.

Высокая теснота связи урожайности сои с факторами среды без учета агротехнологий при использовании как погоды, так и климата согласуется с результатами других авторов и объясняется, по-видимому, зависимостью самих агротехнологических факторов от погодных условий.

Климат в регионе за время от определения норм до опыта изменился: рост годовой суммы осадков составил 44,4% (258 мм/год), годовая среднесуточная температура повысилась на $1,83^\circ\text{C}$, рост ночной среднегодовой температуры равен $2,75^\circ\text{C}$. Если связи с температурами в опыте положительны, то связи с выросшими месячными осадками в опыте меняют знаки в течение года.

Термогумидный тренд в регионе в общем благоприятен для сои, т.е. в опыте ее урожайность возростала с ростом как дневной температуры июля, так и осадков февраля.

Литература

1. Синеговский М.О. Соя – культура мирового земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2023. – № 5. – С.22-25.
2. Синеговская В.Т. Состояние и перспективы научного обеспечения производства сои // Дальневосточный аграрный вестник. – 2016. – № 4(40). – С.8-12.
3. Шабалда О.Г., Пимонов К.И., Зайцев Н.И., Фролов С.С., Гусева Н.А. Реакция сортов сои различных групп спелости на абиотические факторы в условиях восточной зоны Краснодарского края // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 10. – С.67-72.

4. Парамонов А.В., Козлов А.А., Романов Б.В., Гуленок Р.А. Влияние метеорологических показателей на структуру и биологическую урожайность сои // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2023. – № 4(48). – С.42-49.
5. Goldblum D. Sensitivity of corn and soybean yield in Illinois to air temperature and precipitation: The potential impact of future climate change // Physical Geography. 2009. V. 30. P. 27–42.
6. Kukul M.S., Irmak S. Climate-driven crop yield and yield variability and climate change impacts on the U.S. Great Plains agricultural production // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 3450.
7. Negi A., Ranjan R., Kumar A. Effect of weather parameters on productivity of soybean crop // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2020. V.SP6. P.227–230.
8. Lin T., Okamoto Y., Nagasaki Y., Shiraiwa T. The influence of high night temperature on yield and physiological attributes of soybean cv. Fukuyutaka // Plant Production Science. 2021. V.24(3). P.267-278.
9. Russell K., Van Sanford D.A. Breeding wheat for resilience to increasing nighttime temperatures // Agronomy. 2020. V.10. P.531.
10. Lobell D.B., Ortiz-Monasterio J.I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: a comparison of empirical and CERES model predictions in three locations // Agronomy Journal. 2007. V.99. P.469–477.
11. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. V. 25. P. 1965–1978.
12. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V.107. P. 1–32.
13. Шарый П.А., Пунский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // Почвоведение. – 2013. – № 11. – С.1344-1356.
14. Peng S., Huang J., Sheehy J., Laza R., Visperas R., Zhong X., Centeno G., Khush G., Cassman K. Rice yields decline with higher night temperature from global warming // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2004. V.101(27). P.9971-9975.
15. Lobell D.B., Asner G.P. Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields // Science. 2003. V.299. P.1032.
16. Шарая Л.С., Рухович О.В., Шарый П.А., Навров А.В. Сравнительное изучение пространственной изменчивости урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки при использовании разных доз удобрений // Плодородие. – 2024. – № 5. – С. 80–85.
17. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Предсказательное моделирование характеристик урожая озимой пшеницы // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. – С.310-326.
18. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А., Романенков В.А. Прогнозирование урожая озимой пшеницы в агроландшафтах методами геоморфометрии// Плодородие. – 2009. – №5 (50). – С. 22-24.
19. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А. Использование характеристик рельефа при анализе пространственной изменчивости урожайности озимой пшеницы в Окском бассейне// Агрохимия. – 2010. – №8. – С. 49-57.
20. Городнюк Ю.П., Волчек А.А., Сидак С.В. Двухкомпонентная климатическая модель урожайности озимых зерновых на региональном уровне // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – №1(136). – С.138–142.

IMPACT OF WEATHER AND CLIMATE ON SOYBEAN YIELD IN THE AMUR REGION

Sharaya L.S.^{1*}, Shary P.A.^{1,2}, Rukhovich O.V.¹

¹ All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

² Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

E-mail: orukhovich@mail.ru

The analysis was made of relationships between soybean yield in 18 districts of the Amur Region with weather conditions averaged over 12 years and with climate norms averaged over 50 years. Multiple regression equations showed a high closeness of the relationship between yield and both weather and climate ($R^2 = 0.935$ and $R^2 = 0.949$, respectively). In the equation with weather conditions, the most influential factor was July day temperature, in equation with climate – factors that characterize annual climatic conditions. Increase of July temperature of 1°C resulted in increase of soybean yield 24% (0.28 t/ha), and increase of annual amplitude of precipitation on 5 mm – in increase of the yield 17% (0.20 t/ha).

Key words: soybean, weather, climatic norms, multiple regression