

Влияние погодно-климатических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе

А.Ю. Новикова^{1, 2}, И.В. Сеферова¹ ✉, А.Ю. Некрасов³, И.Н. Перчук¹, Т.В. Шеленга¹, М.Г. Самсонова², М.А. Вишнякова¹

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Кубанская опытная станция – филиал Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Краснодарский край, Гулькевичский район, пос. Ботаника, Россия

Для адресного подбора исходного материала в селекции на качество семян сои необходимо знание зависимости соответствующих характеристик семян от погодно-климатических условий в конкретном регионе. Определенное влияние на качество семян оказывает и глобальное изменение климата. Поэтому целью данной работы было выявление связи изменчивости содержания белка и масла в семенах сои с климатическими параметрами на Северном Кавказе, а также трендов этой изменчивости за длительный временной период. На основе изучения 1442 образцов сои из коллекции ВИР оценены тенденции изменчивости содержания белка и масла в семенах в условиях Краснодарского края за период 1987–2015 гг. Методом регрессионного анализа в разностях с последовательным включением переменных построены модели зависимости содержания белка и масла от обобщенных агрометеорологических показателей. В течение 1987–2015 гг. для периода с температурами выше 10 °C наблюдался рост сумм активных температур на 218 °C/10 лет и недостоверное уменьшение осадков на 20.9 мм/10 лет. В динамике содержания белка выявлен тренд к росту на 2.5 % за 10 лет, по содержанию масла достоверной тенденции нет. Наибольшее среднее содержание масла и наименьшее белка было у среднеспелых образцов (22.2 и 38.8 %), а относительно высоким содержанием белка характеризовались ранние (21.6 и 40.0 %) и поздние (20.2 и 39.9 %) образцы. Содержание белка росло с увеличением продолжительности периода с температурами выше 22 °C и уменьшалось с ростом осадков за период с температурами выше 18 °C. Накоплению масла в семенах способствовало увеличение гидротермического коэффициента за период с температурами выше 19 °C, у поздних сортов этому препятствовал длительный осенний период с температурами ниже 15 °C. Многолетний рост содержания белка обусловлен как изменением климата, так и генетическим улучшением сортов.

Ключевые слова: соя; белок; масло; изменения климата; Северный Кавказ.

Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus

L.Yu. Novikova^{1, 2}, I.V. Seferova¹ ✉, A.Yu. Nekrasov³, I.N. Perchuk¹, T.V. Shelenga¹, M.G. Samsonova², M.A. Vishnyakova¹

¹ Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

³ Kuban Experiment Breeding Station, Branch of N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, village Botanika, Gul'kevichskii Region, Krasnodarskii Krai, Russia

For a targeted search of initial breeding material for the quality of soybean seeds, it is necessary to know the patterns of the dependence of the corresponding seed characters on the weather and climatic conditions in a particular region. Global climatic change, the concretization of which is relevant, has a share in this dependence. Thus, the aim of this work was to identify the relationship between the variability of protein and oil content in soybean seeds with climatic parameters in the North Caucasus as well as trends in this variability over a long time period. The study of 1442 soybean accessions from VIR collection in the Krasnodar region during 1987–2015 had been carried out and the tendencies of the variability of protein and oil content in seeds in this environment were estimated. The regression analysis in differences with forward stepwise selection of variables has been used to construct models for the dependence of the protein and oil content on generalized agrometeorological indices. During 1987–2015, for the period with temperatures above 10 °C, the sums of active temperatures increased by 218 °C/10 years and precipitation decreased by 20.9 mm/10 years. In the dynamics of protein content, a trend has been revealed as an increase by 2.5 % over 10 years, while there is no reliable trend in oil content. The maximum average mean of oil content and the smallest protein were in the middle-maturing accessions (22.2 and 38.8 %), and a relatively high protein content was detected, on average, in the early- (21.6 and 40.0 %) and late-maturing (20.2 and 39.9 %) varieties. The protein content had been increasing with a growth of the duration of the period with temperatures above 22 °C and decreasing with a raise in precipitation over a period of temperatures above 18 °C. The accumulation of oil in seeds was promoted by an increase of the hydrothermal coefficient over the period with temperatures above 19 °C, and, in late-maturing varieties, prevented by a prolonged

autumn period with temperatures below 15 °C. Long-term growth in protein content is due to both climatic change and genetic improvement of varieties.

Key words: soybean; protein; oil; climate change; North Caucasus.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Некрасов А.Ю., Перчук И.Н., Шеленга Т.В., Самсонова М.Г., Вишнякова М.А. Влияние погодноклиматических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018;22(6):708-715. DOI 10.18699/VJ18.414

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Novikova L.Yu., Seferova I.V., Nekrasov A.Yu., Perchuk I.N., Shelenga T.V., Samsonova M.G., Vishnyakova M.A. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(6):708-715. DOI 10.18699/VJ18.414 (in Russian)

Соя (*Glycine max* Merr.) – самая популярная в мире белково-масличная культура, имеющая широкий спектр применения. История сои – это история адаптации вида в условиях различных режимов увлажнения, температуры, длины дня и других климатических параметров. Народная, а затем и научная селекция сои первоначально была нацелена на повышение содержания масла в семенах. На это указывает само историческое название сои – масляничные бобы, а также данные из старых научных публикаций (Врочинский, 1935). За последние десятилетия селекционные усилия во всем мире сместились в сторону повышения содержания белка в семенах (Зеленцов, Мошненко, 2016). Согласно авторитетному источнику – оценочной базе данных коллекции сои Сельскохозяйственного департамента США, насчитывающей около 20 тыс. образцов, содержание белка в семенах культурной сои варьирует в пределах 31.7–57.9%, масла – 6.5–25.6% (USDA, 2018). Масштабные исследования коллекционных образцов сои, выполнявшиеся в ВИР, выявляли схожие интервалы этих показателей (Щелко и др., 1990).

Оптимальным для формирования генеративных органов и плодоношения сои считают среднесуточные температуры 18–22 °С (Белолобцев, Сенников, 2012). Наш анализ многолетних данных, основывающийся на регрессионных моделях хозяйственно ценных признаков сорта Комсомолка в условиях Краснодарского края, выявил, что главным погодноклиматическим фактором роста и развития сои является гидротермический коэффициент (ГТК), т. е. соотношение осадков и температур. Показано, что вегетационный период укорачивается с уменьшением ГТК при температурах выше 15 °С, а урожайность и высота растений положительно связаны с ГТК при температурах выше 10 °С (Сеферова и др., 2011).

Известно, что содержание белка и масла в семенах сои подвержено высокой генотипической и модификационной изменчивости. В литературе накоплено множество сведений о зависимости этих показателей от района возделывания культуры, генотипа сорта, группы спелости, использования разных приемов агротехники и т. п. Неоднократно показано, что в разных регионах земного шара гораздо более выражено влияние климата на содержание белка в семенах, чем на содержание масла (Ojo et al., 2002; Sudaric et al., 2006; Ермолина и др., 2011), и оба эти признака значительно варьируют в разных условиях выращивания (Piper, Boote, 1999; Bellaloui et al., 2015; Song et al., 2016).

Результаты, полученные ранее в Краснодарском крае, где проводилось и настоящее исследование, свидетель-

ствуют, что высокое содержание масла наблюдается при повышенном увлажнении и относительно невысокой температуре, а белка – при сухой погоде и повышенной температуре (Енкен, 1953; Мякушко, Баранов, 1984; Степанова, 1985; Баранов, Лукомец, 2005; Петибская, 2012). При этом отмечалось, что межсортовые различия содержания белка и масла у сои могут быть меньше межгодовых (Енкен, 1953). Выявление закономерностей взаимосвязи признаков и среды для определения оптимальных районов производства сои и выбора адаптивных сортов приобретает особую актуальность в связи с явными изменениями климата, отмечаемыми в том числе в районе нашего исследования (Зеленцов, Мошненко, 2012).

Качественный состав семян, кроме условий выращивания, зависит от целого ряда факторов, одним из которых является селекционное улучшение культуры. На современном этапе селекционеры уделяют значительное внимание повышению содержания как белка, так и масла в семенах сои. Получены сорта с содержанием белка в семенах 47–49%, а в отдельные годы до 50% при достаточно высокой продуктивности (Кочегура и др., 2005). Учитывая этот, а также ряд других факторов, включая агротехнику, для исследования влияния климата на признаки сельскохозяйственных культур необходимо вычленять именно погодноклиматические зависимости. Для этого используют методы исключения трендов из многолетних наблюдений, позволяющие существенно улучшить качество агрометеорологических регрессионных моделей (Kaukoranta, Nakala, 2008; Per et al., 2017). Одним из методов исключения трендов является анализ в разностях, т. е. анализ годовых приростов признаков (Елисеева, 2007; Сиротенко, 2012), не нашедший пока широкого применения в агрометеорологии. Анализ годовых приростов значений признаков был успешно использован для построения моделей динамики продолжительности вегетации, массы 1000 семян, высоты растения и урожайности сои в наших предыдущих исследованиях (Сеферова и др., 2011).

Цель данной работы – выявление связи изменчивости содержания белка и масла в семенах сои с агроклиматическими показателями на Северном Кавказе, а также трендов этой изменчивости за длительный временной период.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили 1442 образца сои из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений (ВИР), происходящих из 35 стран. Выборка представлена преимущественно селекционными сортами. Исследование проводили в 1987–2015 гг. в

Краснодарском крае на филиале ВИР «Кубанская опытная станция» – КОС ВИР (45°13' с. ш., 40°47' в. д.). Ежегодно в исследование включали от 12 до 516 образцов. Каждый образец изучался на протяжении одного-трех лет. Наиболее продолжительными – 14 лет (1987–2000 гг.) были наблюдения за сортом Комсомолка, который являлся стандартом в полевой и биохимической оценке образцов. Измеряли содержание белка и масла в семенах, продолжительность вегетации. Использовали также данные по продуктивности, массе 1000 семян, высоте растений за 1987–2001 гг. Были использованы суточные данные метеопункта КОС ВИР.

Полевую оценку и измерения биохимических показателей проводили в соответствии с методическими указаниями ВИР (Корсаков и др., 1975; Вишнякова, 2010). До 2006 г. белок определяли по Кьельдалю ($N \times 6.25$), масло – по массе сухого обезжиренного остатка в модификации Рушковского (Ермаков, 1987). С 2007 г. белок и масло определяли методом инфракрасной спектроскопии (NIR) на анализаторе Infratec 1241 Grain Analyzer (Швеция). Калибровочные кривые стандартизированы фирмой-производителем.

Рассчитано среднее по коллекции содержание белка и масла за каждый год. Определены тренды среднего по коллекции содержания белка и масла за период исследования, построены регрессионные модели этих показателей. Рассчитаны средние температуры и суммы осадков за месяцы с апреля по октябрь и обобщенные агрометеорологические показатели: даты перехода выше и ниже температур 10, 11, ... 22 °С, продолжительности периодов с температурами выше указанных пределов, суммы активных и эффективных температур, средние активные и эффективные температуры, ГТК этих интервалов. Эти показатели использованы в качестве переменных в регрессионных моделях. Методом регрессионного анализа с последовательным включением переменных построены модели зависимости содержания белка и масла от агроклиматических показателей. Из временных рядов исключен тренд за счет перехода к анализу годовых приростов показателей.

По *t*-критерию Стьюдента оценена достоверность различий биохимических показателей (и других хозяйственно ценных признаков) у образцов трех групп, выделенных по срокам созревания. В исследовании принят уровень значимости 5 %.

Результаты

Среднее содержание белка в семенах образцов в изученной выборке (далее – коллекции) варьировало от 27.2 до 50.0 %, масла – от 15.2 до 26.6 % (рис. 1). Крайние пределы изменчивости составили для белка 23.8–51.1 %, для масла – 13.8–27.2 %. Содержание масла и белка в образцах обратно коррелированы, коэффициент корреляции $r = -0.53$. При увеличении масла в среднем на 1 % белок уменьшался на 1.1 %.

На рис. 1 отображены все выявленные в исследовании сочетания содержания белка и масла в семенах. В них суммируется как генетическая, так и средовая изменчивость образцов. Видно, что самые высокие значения белка соответствуют низким значениям масла. Этот вариант было

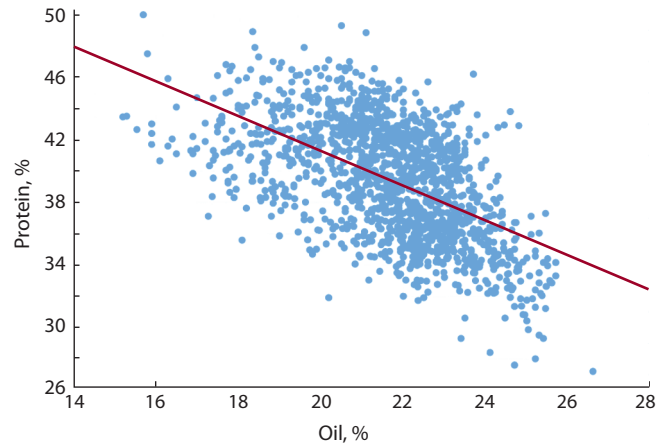


Fig. 1. Distribution of soybean accessions by protein and oil contents in seeds.

предложено называть липидно-деградационным (ЛД) (Зеленцов, Мошненко, 2016). Достаточно высокие значения белка приходится и на средние значения масла. Небольшое число образцов имеют одновременно высокие значения содержания белка и масла, т. е. относятся по определению цитируемых авторов к углеводно-деградационному варианту (УД), поскольку снижается количество углеводов. Высокое содержание масла выявляется как при УД варианте, так и при средних значениях содержания белка. Наиболее высокие значения масла соответствуют низким значениям по белку. Этот вариант мы предлагаем назвать протеин-дефицитным (ПД).

В 1987–2015 гг. на Кубанской ОС наблюдался достоверный рост сумм активных температур (выше 10 °С) на 218 °С/10 лет и слабое уменьшение осадков – на 20.9 мм/10 лет.

Отмечалась достоверная тенденция к росту среднего по коллекции содержания белка со скоростью 2.5 %/10 лет; доля масла снижалась незначимо – на 0.1 %/10 лет (рис. 2). Рост белка в семенах мог определяться тремя причинами: изменениями климата, обогащением коллекции высокобелковыми образцами современной селекции и агротехникой. Учитывая, что изучение коллекции выполнялось на КОС ВИР все годы по единой методике, возможное влияние изменения агротехники было исключено из рассмотрения.

Для выявления селекционного тренда сравнили динамику среднего по исследуемой выборке и сорта-стандарта Комсомолка в 1987–2000 гг. За этот период содержание белка и масла в семенах сорта Комсомолка не имело достоверных трендов. Среднее по коллекции содержание белка достоверно увеличивалось на 5 % за 10 лет (рис. 3, а). Это свидетельство вклада селекции в увеличение содержания белка и отсутствие такового в увеличении масличности. Для выявления погодно-климатических зависимостей были рассчитаны приросты всех исследуемых показателей за год (разности) (см. рис. 3, б). Корреляции приростов среднего по коллекции и сорта Комсомолка достигли: для белка $r = 0.90$, для масла $r = 0.88$.

Регрессионный анализ показал, что содержание масла (C_o) положительно зависело от ГТК за период с температурами выше 19 °С ($ГТК_{19}$) и отрицательно – от про-

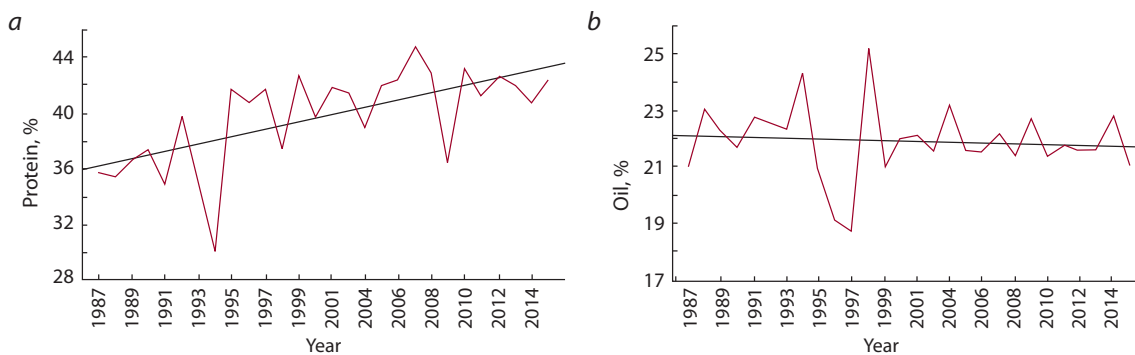


Fig. 2. Time variation of the contents of (a) protein and (b) oil, both averaged over the collection, Kuban experimental farm, 1987–2015.

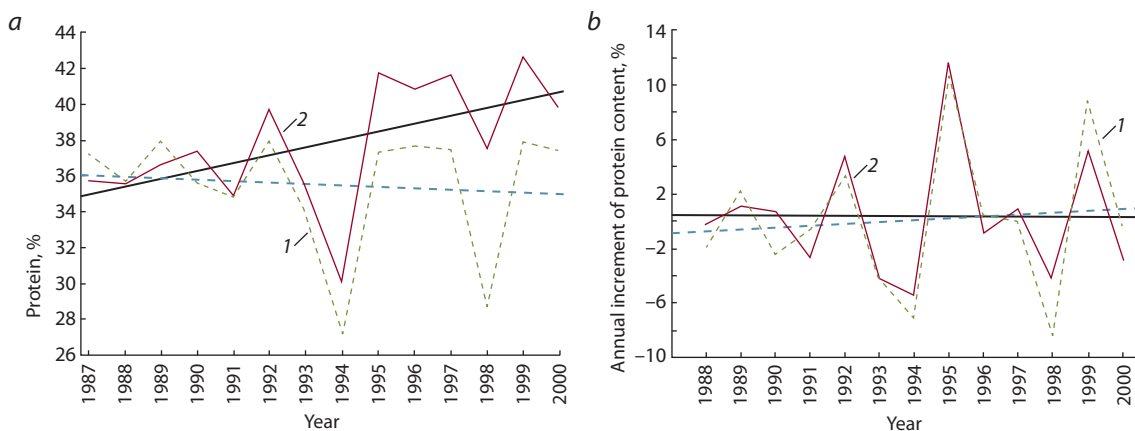


Fig. 3. Time variation of (1) protein content in Komsomolka variety and (2) protein content averaged over the collection: (a) starting levels, (b) annual increments.

должительности вегетации в осенний период при температурах 15–10 °C (L_{15-10}):

$$\Delta C_o = -0.012 + 0.951 \text{ГТК}_{19} - 0.041 L_{15-10}, \quad R^2 = 0.49. \quad (1)$$

Здесь Δ – годовой прирост показателя, R^2 – коэффициент детерминации уравнения.

Главным фактором изменчивости содержания белка (C_p) является продолжительность периода с температурами выше 22 °C (L_{22}). Осадки за период с температурами выше 18 °C (P_{18}) снижают содержание белка:

$$\Delta C_p = -0.201 + 0.092 \Delta L_{22} - 0.010 \Delta P_{18}, \quad R^2 = 0.65. \quad (2)$$

Объясненная уравнением доля межгодовой изменчивости составила 65 %. Расчет частных коэффициентов детерминации показал, что температурный фактор определял 44 % изменчивости, осадки – 21 %. То есть рост осадков при температурах выше 18–19 °C способствует формированию масла и, соответственно, снижению доли белка. В период с температурами выше 22 °C, напротив, накопление масла сокращается и процентное соотношение смещается в сторону белка. Продолжительный период роста при температурах ниже оптимальных 15 °C в осенний период также приводит к уменьшению содержания масла и увеличению процентного содержания белка у поздних сортов. Полученные результаты подтверждают, что накопление масла успешно проходит в интервале

оптимальных для формирования генеративных органов и плодоношения сои температурах 18–22 °C и увеличивается с ростом ГТК₁₉.

По формулам (1) и (2) рассчитаны скорости изменения содержания белка и масла, объясняемые изменениями климата. В 1987–2015 гг. скорости изменения агрометеорологических факторов, значимых для биохимических показателей сои, составили: $\Delta L_{22} = 21.1$ сут/10 лет, $\Delta P_{18} = 31.1$ мм/10 лет; $\Delta L_{15-10} = -1.8$ сут/10 лет, $\Delta \text{ГТК}_{19} = 0.016$ ед./10 лет. Расчетный климато-обусловленный тренд (без учета свободного члена, отражающего неклиматические воздействия) составляет для содержания белка 1.6 % за 10 лет, а для содержания масла – 0.1 %. Таким образом, из фактически наблюдающегося повышения содержания белка на 2.5 %/10 лет, 1.6 % объясняются изменениями климата, а остальные 0.9 % можно отнести к успехам селекции.

Выявленные закономерности изменчивости биохимических показателей семян сои от тепло- и влагообеспеченности, полученные при анализе межгодовой изменчивости, подтверждаются зависимостью содержания белка и масла от продолжительности вегетации. Показано, что эти показатели нелинейно связаны с продолжительностью вегетации образцов (рис. 4).

Для дальнейшего анализа изучаемый набор был разделен на три группы по продолжительности вегетации

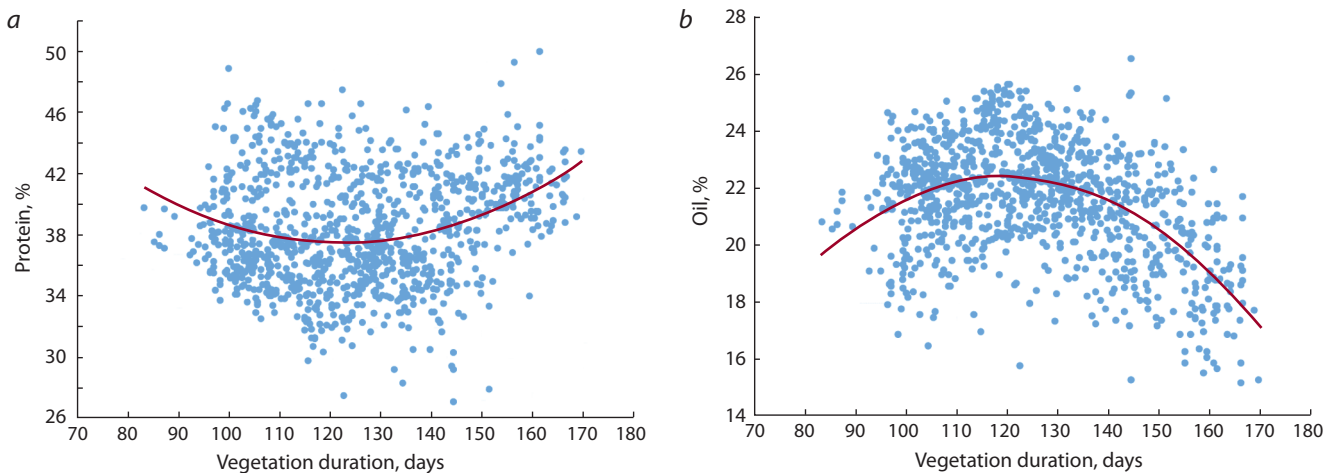


Fig. 4. Dependence of (a) protein content and (b) oil content in soybean seeds on vegetation duration in the Kuban experimental farm, VIR, approximated by a second-order polynomial.

Characterization of groups of soybean varieties differing in ripening time, Kuban experimental farm, VIR, 1987–2001

Vegetation, days	erformance, g/plant	1000 seed weight	Plant height, cm	Protein, %	Oil, %
80–110	20.1 ± 8.0	164.6 ± 23.8	67.3 ± 18.2	40.0 ± 3.6	21.6 ± 1.5
111–140	26.0 ± 8.5	166.8 ± 29.0	83 ± 14.8	38.8 ± 3.8	22.2 ± 1.6
141–170	26.9 ± 11.6	178.8 ± 46.7	88.4 ± 15.9	39.9 ± 3.4	20.2 ± 2.1
Total	24.9 ± 9.8	170 ± 34.9	81 ± 17.8	39.4 ± 3.7	21.7 ± 1.8

Note. Mean values and standard deviations are shown.

(см. таблицу), которые можно определить как скороспелая (вегетация 80–110 сут), среднеспелая (111–140 сут) и позднеспелая (141–170 сут). Наибольшее среднее содержание масла – 22.2 % и наименьшее белка – 38.8 % были у среднеспелой группы, характеризующейся высокой продуктивностью – 26.0 г/растение и средним значением высоты растений – 83 см. Ранние образцы имели самое высокое содержание белка – 40.0 %, более низкое масла – 21.6 %, меньшую высоту растения и продуктивность. Образцы позднеспелой группы характеризовались высоким содержанием белка – 39.9 % и меньшим содержанием масла – 20.2 %, а также наибольшей высотой растений и наибольшей массой 1000 семян, а по продуктивности не отличались достоверно от среднеспелой группы.

Обсуждение

Широкий спектр использования сои требует создания специализированных сортов. Расширение ее производственного ареала, которое произошло в РФ в последние 10–15 лет, вызывает необходимость получения сортов разных групп спелости, оставляя приоритет за скороспелыми. При этом селекция любых сортов ориентирована на высокое качество семян, а именно на высокое содержание белка и масла – признаков, подверженных модификационной изменчивости.

В нашем исследовании, проводившемся на Северном Кавказе в течение 29 лет, выяснилось, что постоянно меняющиеся погодные условия и глобальные изменения климата способствуют повышению содержания белка в семенах. В целом по коллекции рост содержания белка

в семенах происходил со средней скоростью 2.5 % за 10 лет. В этот показатель, несомненно, вносит вклад и селекционное улучшение культуры. Об этом можно судить, сравнивая данные по изученной выборке с данными по сорту Комсомолка, используемому в течение 1987–2000 гг. в качестве стандарта. За этот период содержание белка и масла в семенах данного сорта не имело достоверных трендов. Полученные регрессионные модели содержания белка и масла объясняют 65 и 49 % межгодовой вариативности этих показателей соответственно. Согласно расчетам, вклад климатического фактора в рост белка составил 1.6 % за 10 лет, а 0.9 % можно отнести на счет пополнения коллекции современными сортами с генетически обусловленным более высоким содержанием белка. При этом увеличение содержания белка происходило на фоне роста сумм активных температур выше 10 °C на 218 °C/10 лет.

В США, главной соеосеющей стране мира, при изучении влияния целого ряда факторов на биохимические показатели семян сои было доказано, что среда – самый важный источник изменчивости содержания белка и масла (Bellaloui et al., 2015). В созданной в США унифицированной системе тестирования сортов сои было проведено самое длительное определение долговременных трендов в содержании белка и масла в семенах, продолжавшееся 51 год (1948–1998) (Yaklich et al., 2002). Работа велась на современных для соответствующих периодов сортах из всех регионов производства сои, включая южные провинции Канады, и всех групп спелости по американской классификации, принятой в те годы: с 00 по VIII. К со-

жалению, в исследовании не учитывались многолетние изменения климата, поскольку главной задачей было сравнение трендов в разных регионах и в разных группах спелости. Максимальное содержание белка (41.4 %) было зафиксировано у самых позднеспелых сортов, наибольшее количество масла (21.0–21.1 %) – у сортов II–IV групп спелости, которые при соотношении с нашей системой можно назвать среднеспелыми. Максимальное соотношение белок : масло (2.00–2.04) выявлено у сортов самых скороспелых групп 00–I, что свидетельствует о преобладании белка, а минимальное (1.99) – у самых позднеспелых групп VII и VIII, что свидетельствует о небольшом превышении у них масла по отношению к белку.

Эти результаты находятся в близком соответствии с полученными нами данными в отношении самых скороспелых и среднеспелых групп. В нашем исследовании ранние сорта имели белок на уровне 40.0 ± 3.6 % и сравнительно высокое масло – 21.6 ± 1.5 %. В данных системы тестирования США три самые скороспелые группы имели практически сравнимое с зафиксированным нами содержание белка – 40.4–40.9 %, но меньшее количество масла – 19.8–20.5 %. Наибольшим содержанием масла в Краснодарском крае (22.2 ± 1.6 %) и наименьшим – белка (38.8 ± 3.8 %), как и в работе американских авторов (Yaklich et al., 2002), характеризовалась группа среднеспелых образцов с продолжительностью вегетации 111–140 сут. Однако самые позднеспелые группы в США имели большее значение обоих показателей – 41.4 % белка и 20.9 % масла по сравнению с позднеспелыми в Краснодарском крае – 39.9 и 20.2 % соответственно. Это можно объяснить тем, что при более длительном вегетационном периоде у сортов VII–VIII групп спелости (200–220 сут), к примеру в южном штате Миссисипи, средние суточные температуры ноября – время уборки сои – составляют около 14 °C (Usual Planting..., 1997), что сравнимо со среднесуточными температурами начала октября – сезона уборки позднеспелых сортов в Краснодарском крае. То есть синтез белка и масла в США не лимитируется низкими температурами октября–ноября и продолжается на 30–50 сут дольше.

Как в нашем исследовании, так и по данным других авторов содержание белка повышается с ростом температур (Sato, Ikeda, 1979; Wolf et al., 1982; Pipper, Boote, 1999; Song et al., 2016). Показано, что при дневных температурах выше 28 °C содержание белка увеличивалось линейно с температурой (Dornbos, Mullen, 1992; Gibson, Mullen, 1996).

Оптимальными среднесуточными температурами для синтеза масла в течение 29 лет наших наблюдений были 18 – 22 °C. Рост осадков при температурах выше 18 – 19 °C способствует повышению содержания масла в семенах. Температуры выше 22 °C и ниже 15 °C (в осенний период) приводили к сокращению накопления масла и, соответственно, увеличению процентного содержания белка.

В публикациях американских ученых (Sato, Ikeda, 1979; Wolf et al., 1982) показано, что содержание масла в семенах сои повышалось до температуры 22 °C и после этого выходило на плато. Большое значение для синтеза масла имеет увлажнение. Если в условиях засухи повышается содержание белка, то при повышении влаж-

ности при благоприятных для этого температурах (выше 18 – 19 °C) увеличивается синтез масла (Лещенко и др., 1985; Dornbos, Mullen, 1992).

В цитируемой нами работе о долговременных трендах качества семян в США (Yaklich et al., 2002) приводятся данные о двадцатилетнем периоде с середины 1950-х до середины 1970-х гг., называемом *benign climate period* – периодом плодоносным, с благотворным или мягким климатом. В эти годы средняя температура июля–августа была на 2 °C ниже средней многолетней, а количество осадков выше. Значительно возросла урожайность многих культур, а у сои, кроме этого, увеличилось более чем на 1.5 % среднее содержание масла в семенах (Andresen et al., 2001). Однако в последующие годы для содержания масла не обнаруживалось какого-либо устойчивого тренда, и, напротив, с 1974 г. оно уменьшалось по необъясненным в публикации причинам (Yaklich et al., 2002).

Различие содержания белка и масла в семенах разных групп спелости можно трактовать, исходя из особенностей метаболизма семян. Синтез белков в семенах сои начинается на 10–15 сут раньше, чем накопление жирных кислот (Кочегура и др., 2005). У скороспелых сортов период налива семян укорочен, и запасующие ткани семядолей, как правило, успевают накопить белок, но не полностью реализовать свой масличный потенциал, что определяет меньшее накопление масла и, соответственно, большую долю белка в семенах. Кроме того, налив семян у скороспелых сортов происходит в Краснодарском крае в условиях высоких температур (выше 22 °C), что, как мы выявили, неблагоприятно для синтеза масла. Сорта средних сроков созревания наливаются в условиях с меньшими температурами, поэтому содержание масла оказывается наиболее высоким, пропорционально несколько сокращается содержание белка. У позднеспелых образцов низкие температуры сентября–октября (10 – 15 °C) снижают накопление масла, поэтому содержание белка повышается. О максимальном накоплении масла в сортах сои среднеспелых групп свидетельствует также исследование, проведенное в Ростовской области РФ (Ермолина и др., 2011). В условиях Аргентины наибольшее содержание масла наблюдалось также у среднеспелых групп II–IV по американской системе (Dardanelli et al., 2006).

В отличие от белка, содержание масла в семенах сои за 29 лет наших наблюдений не показало какого-либо значимого тренда. Аналогичные результаты были получены при испытаниях, проведенных в разных регионах Африки: показано, что независимо от района исследования, влияние климата на содержание белка в семенах сои гораздо более выражено, чем на содержание масла (Ojo et al., 2002).

Итоговая гипотеза, предлагаемая нами как обобщение проанализированных данных, в виде схемы отображена на рис. 5. В благоприятных условиях масло накапливается и достигает генетически обусловленного максимума. Эти условия (среднесуточная температура 18 – 22 °C при достаточном увлажнении) соответствуют оптимальным для формирования урожая семян сои (Белолобцев, Сенников, 2012). В менее благоприятных условиях масло накапливается не полностью, а доля белка в семенах становится больше. Конкретные значения ГТК не были рассчитаны, так как на рост растений влияют не только атмосферные

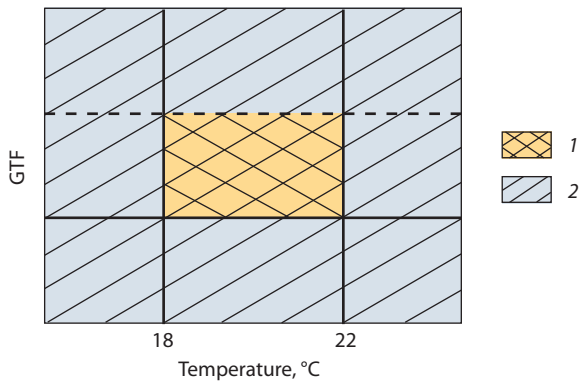


Fig. 5. Oil contents in soybean seeds depending on mean daily temperature and hydrothermal factor: (1) conditions favorable for oil accumulation, (2) unfavorable.

осадки, но и запасы доступной почвенной влаги. Мы предполагаем возможность избыточного увлажнения, но в нашем исследовании такие варианты не были зафиксированы. В генофонде сои имеется изменчивость по чувствительности к учитываемым параметрам, что делает возможным отбор генотипов для селекции в различных регионах.

Зависимость биохимических признаков семян сои, в частности изменчивость содержания белка и масла от погодных условий и изменений климата, показана нами для определенного региона РФ – Северного Кавказа. Выявленные вновь и подтвержденные нами известные ранее закономерности могут быть полезны для выбора регионов производства сои для конкретных целей: получения преимущественно белка или масла. При этом целесообразно подбирать в генофонде соответственно высокобелковые или высокомасличные формы определенных групп спелости.

Acknowledgements

This work was supported by the Federal Targeted Program “Research and development in the top-priority fields of the scientific and technological complex of Russia, 2014–2020”, agreement 14.575.21.0136 of 26.09.2017. Experiments were conducted at the premises of the unique research facility “VIR plant genetic resources gene bank”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Andresen J.A., Alagaraswamy G., Rotz C.A., Ritchie J.T., LeBaron A.W. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the great lakes region. 1895–1996. *Agron. J.* 2001;93:1059-1070. DOI 10.2134/agronj2001.9351059x.

Baranov V.F., Lukomec V.M. (Ed.). Soybean: Biology and Technology of Cultivation. Krasnodar: Sovetskaya Kuban' Publ., 2005. (in Russian)

Bellaloui N., Bruns H.A., Abbas H.K., Mengistu A., Fisher D.K., Reddy K.N. Agricultural practices altered soybean seed protein, oil, fatty acids, sugars, and minerals in the Midsouth USA. *Front. Plant Sci.* 2015;6:31. DOI 10.3389/fpls.2015.00031.

Belolyubcev A.I., Sennikov V.A. Bioclimatic Potential of Ecosystems: Manual. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2012. (in Russian)

Dardanelli J.L., Balzarini M., Martinez M.J., Cuniberti M., Resnik S., Ramunda S.F., Herrero R., Baigorri H. Soybean maturity groups, environments, and their interaction define mega-environments for seed composition in Argentina. *Crop Sci.* 2006;46(5):1939-1947. DOI 10.2135/cropsci2005.12-0480.

Dornbos D.L., Mullen R.E. Soybean seed protein and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1992;69:228-231. DOI 10.1007/BF02635891.

Eliseeva I.I. (Ed.). *Econometrics*. Moscow: Finansy i Statistika Publ., 2007. (in Russian)

Enken V.B. Soybean. Economic value. In: *Grain Legumes*. Moscow; Leningrad: Sel'khozgiz Publ., 1953;174-220. (in Russian)

Ermakov A.I. (Ed.). *Methods of Biochemical Evaluation of Plants*. Leningrad, 1987. (in Russian)

Ermolina O.V., Antonov S.I., Korotkova O.V. Change of soybean seed quality during breeding in the Don region. *Zernovoe Khozjaistvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2011;6:20-28. (in Russian)

Gibson L.R., Mullen R.E. Soybean seed composition under high day and night growth temperatures. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1996;73:733-737. DOI 10.1007/BF02517949.

Iler A.M., Inouye D.W., Schmidt N.M., Høye T.T. Detrending phenological time series improves climate-phenology analyses and reveals evidence of plasticity. *Ecology*. 2017;98(3):647-655. DOI 10.1002/ecy.1690.

Kaukoranta T., Hakala K. Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agric. Food Sci.* 2008; 17:165-176. DOI 10.2137/145960608785328198.

Kochehura A.V., Zelentsov S.V., Moshnenko E.V., Petibskaya V.S. Breeding and genetic improvement of biochemical parameters in soybean. *Maslichnye Kultury. Nauchno-Tekhnicheskij Byulleten VNIIMK = Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Oil Crops*. 2005;2(133):24-35. (in Russian)

Korsakov N.I., Adamova O.P., Budanova V.I. Methodical Guidelines on the Study of the Collection of Grain Legumes. Leningrad: VIR Publ., 1975. (in Russian)

Leshchenko A.K., Mikhailov V.G., Sichkar V.I. Soybean Breeding, Seed Studies, and Seed Industry. Kiev: Urozhaj Publ., 1985. (in Russian)

Myakushko Yu.P., Baranov V.F. Soybean. Moscow: Kolos Publ., 1984. (in Russian)

Ojo D.K., Adebisi M.A., Tijani B.O. Influence of environment on protein and oil contents of soybeans seed (*Glycine max* (L.) Merrill). *Global J. Agric. Sci.* 2002;1(1):27-32. DOI 10.4314/gjass.v1i1.2199.

Petibskaya V.S. Soy: Chemical Composition and Use. Krasnodar, 2012. (in Russian)

Piper E., Boote K.I. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1999;76(10): 1233-1241. DOI 10.1007/s11746-999-0099-y.

Sato K., Ikeda T. The growth responses of soybean to photoperiod and temperature. IV. The effect of temperature during the ripening period on the yield and characters of seeds. *Jpn J. Crop. Sci.* 1979;48:283-290. DOI 10.1626/jcs.48.283.

Seferova I.V., Novikova L.Yu., Nekrasov A.Yu. Assessment of the response of soybean cv. Komsomolka to climate changes in the Krasnodar region. *Maslichnye Kultury. Nauchno-Tekhnicheskij Byulleten VNIIMK = Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Oil Crops*. 2011;1(146-147):72-77. (in Russian)

Shchelko L., Sedova T., Kornejchuk V., Pastukha L., Sinskiy T., Gofirek P., Baresh I., Segalova I. The International Comecon List of Descriptors for the Genus *Glycine* Willd. Leningrad, 1990. (in Russian)

Sirotenko O.D. Basis of Agricultural Meteorology. Vol. 2: Methods of Calculations and Forecasts in Agricultural Meteorology. Book 1: Mathematical Models in Agricultural Meteorology. Obninsk, 2012. (in Russian)

- Song W., Yang R., Wu T., Wu C., Sun S., Zhang S., Jiang B., Tian S., Liu X., Han T. Analyzing the effects of climate factors on soybean protein, oil contents, and composition by extensive and high-density sampling in China. *J. Agric. Food Chem.* 2016;64(20):4121-4130. DOI 10.1021/acs.jafc.6b00008.
- Stepanova V.M. *Climate and Variety: Soybean*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1985. (in Russian)
- Sudaric A., Simic D., Vratarić M. Characterization of genotype by environment interactions in soybean breeding programmes of Southeast Europe. *Plant Breed.* 2006;125:191-194. DOI 10.1111/j.1439-0523.2006.01185.x.
- USDA (United States Department of Agriculture). Agricultural Research Service. <https://www.ars-grin.gov/npgs/index.html>. Available 08.02.2018.
- Usual Planting and Harvesting Dates for U.S. field crops. Agricultural Statistics Board December. National Agricultural Statistic Service, USDA. 1997. *Agricultural Handbook*.
- Višnyakova M.A. (Ed.). *Collection of World Genetic Resources of Grain Legumes in VIR: Enlargement, Preservation, and Investigation*. St. Petersburg: VIR Publ., 2010. (in Russian)
- Vrochinskij I.D. Breeding works of the Harbin experimental field of CER. Work of the Agronomical Branch of the Land Department of CER over 12 years (1922–1933). Harbin, 1935:251-299. (in Russian)
- Wolf R.B., Cavins J.F., Kleiman R., Black L.T. Effect of temperature on soybean seed constituents: oil, protein, moisture, fatty acids, amino acids, and sugars. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1982;59:230-232. DOI 10.1007/BF02582182.
- Yaklich E.W., Vinyard B., Camp M., Douglass S. Analysis of seed protein and oil from soybean Northern and Southern Region Uniform Tests. *Crop. Sci.* 2002;42:1504-1515. DOI 10.2135/cropsci2002.1504.
- Zelentsov S.V., Moshnenko E.V. Ways of adaptation of Russian agriculture to global climatic changes by the example of soybean ecological breeding. *Nauchnyi Dialog = Scientific Dialogue*. 2012; 7:40-59. (in Russian)
- Zelentsov S.V., Moshnenko E.V. Prospects of the breeding of high-protein soybean varieties: modeling of mechanisms increasing protein content in seeds: Report 1. *Maslichnye Kultury. Nauchno-Tekhnicheskiiy Byulleten VNIIMK = Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Oil Crops*. 2016;2(166):34-41. (in Russian)

ORCID ID

L.Yu. Novikova orcid.org/0000-0003-4051-3671

I.V. Seferova orcid.org/0000-0003-3308-9198

A.Yu. Nekrasov orcid.org/0000-0001-7332-1209

I.N. Perchuk orcid.org/0000-0001-6568-5248

T.V. Shelenga orcid.org/0000-0003-3992-5353

M.G. Samsonova orcid.org/0000-0001-8170-1260

M.A. Višnyakova orcid.org/0000-0003-2808-7745